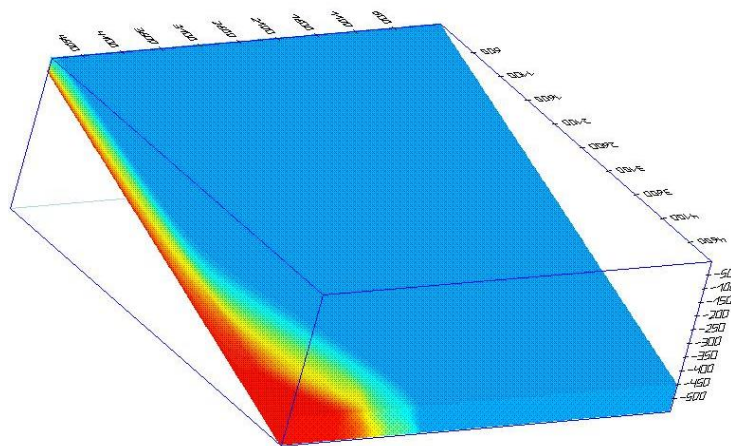


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

# Τρισδιάστατη μαθηματική προσομοίωση παράκτιων υδροφορέων με το λογισμικό FEFLOW



# Τσάνης Άρης

**Επιβλέπουσα: Αικατερίνη Νάνου – Γιάνναρου**

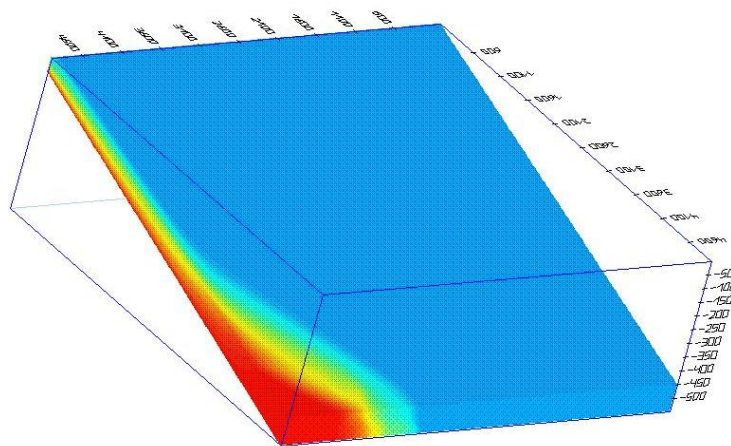
## Λέκτορας

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Τρισδιάστατη μαθηματική προσομοίωση παράκτιων  
υδροφορέων με το λογισμικό FEFLOW**



**Τσάνης Άρης**  
**Επιβλέπουσα: Αικατερίνη Νάνου – Γιάνναρου**  
**Λέκτορας**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010**

*Στους γονείς μου*  
*&*  
*Στους Αντί*

## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την καθοδήγηση και τη βοήθεια της επιβλέπουσας, κ<sup>α</sup>ς Νάνου – Γιάνναρου Αικατερίνης, Λέκτορα Ε.Μ.Π., την οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω για την προσφορά των γνώσεων της και την κατανόηση της καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επιπροσθέτως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ<sup>ο</sup> Α. Στάμου, Καθηγητή, την κ<sup>α</sup> Σ. Δούκα, Υπ. Διδάκτορα και ιδιαίτερα τον κ<sup>ο</sup> Ι. Νικηφοράκη, Υπ. Διδάκτορα για την βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εκμάθησης του λογισμικού FEFLOW.

## Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	7
Abstract .....	9
1. Εισαγωγή .....	11
1.1. Γενικά .....	11
1.2. Διάρθρωση της εργασίας .....	12
2. Υφαλμύρωση σε παράκτιους υδροφορείς .....	13
2.1 Η υφαλμύρωση ως φυσικό φαινόμενο.....	13
2.2. Τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης .....	17
3. Πεπερασμένα στοιχεία : βασική ιδέα , σχεδιασμός στο λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW .....	20
3.1. Βασική ιδέα .....	20
3.2. Σχεδιασμός και δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW .....	21
4. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της υφαλμύρωσης .....	23
4.1. Γενικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας (κεφ.9,[5]).....	23
4.2. Ειδικά θέματα .....	25
5. Περιγραφή του προβλήματος .....	33
5.1. Υδροφορείς που μελετώνται .....	33
6. Μαθηματική προσομοίωση του προβλήματος στο λογισμικό FEFLOW .....	43
6.1. Διαστάσεις του κάναβου .....	43
6.2. Διάσταση στρώσεων .....	45
6.3. Αριθμητικό σχήμα .....	45
6.4. Μεγέθη που υπολογίζονται .....	45
6.5. Τρόποι παρουσίασης των αποτελεσμάτων .....	46
6.6. Αδιάστατοι αριθμοί.....	49
7. Οριζόντιος υδροφορέας.....	51

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στον οριζόντιο υδροφορέα πάχους πενήντα μέτρων .....	51
7.1. Διαδικασία επιλογής διαστάσεων πεπερασμένων στοιχείων και αριθμητικού σχήματος...	51
7.2. Διερεύνηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε παραμέτρους του προβλήματος .....	63
8. Βασικά μοντέλα .....	72
8Α. Υδροφορείς σταθερού ύψους (πάχους) .....	74
8Β. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου ύψους (πάχους) .....	126
9. Σύγκριση αποτελεσμάτων βασικών μοντέλων .....	178
9.1. Σύγκριση του εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού κατα μήκος του σύνορου-θάλασσα σε σχέση με την κατεύθυνση των κλίσεων του υδροφορέα .....	178
9.2. Σύγκριση της κατανομής συγκέντρωσης άλατος σε σχέση με τον αδιάστατο αριθμό $N_b$ ..	182
9.3. Σύγκριση της εισερχόμενης/εξερχόμενης ποσότητας διαλυμένης ουσίας (άλατος) κατα μήκος του σύνορου-θάλασσα σε σχέση με την κατεύθυνση των κλίσεων του υδροφορέα ...	184
10. Διερεύνηση για μεγαλύτερες τιμές ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) .....	188
10.1. Συγκέντρωση άλατος – Μέγιστο μήκος διείσδυσης .....	188
10.2. Συγκέντρωση άλατος - Μέγιστο μήκος διείσδυσης προς πάχος υδροφορέα στη θάλασσα ως προς την κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι σύνορο .....	192
10.3. Συγκέντρωση άλατος - Σύγκριση θεωρητικής λύσης και λύσης με το λογισμικό FEFLOW για τον οριζόντιο υδροφορέα .....	195
11. Συμπεράσματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	197
11.1. Συμπεράσματα .....	197
11.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	202
Βιβλιογραφία .....	203
Ελληνική .....	203
Αγγλική .....	203
Ιστότοποι .....	205

## Περίληψη

Στους παράκτιους υδροφορείς το ελαφρύτερο γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το βαρύτερο θαλάσσιο αλμυρό νερό με αποτέλεσμα το πρώτο ουσιαστικά να επιπλέει επάνω στο δεύτερο. Σε όλες τις περιπτώσεις, κάτω από το γλυκό νερό υπάρχει ένα σώμα αλμυρού νερού με τη μορφή σφήνας.

Στην πραγματικότητα κατά την επαφή των δύο ρευστών λαμβάνουν χώρα δύο ταυτόχρονες διαδικασίες : i) Αντικατάσταση του γλυκού νερού από το πυκνότερο θαλάσσιο ii) Κίνηση της διαλυμένης ουσίας εντός της ζώνης ανάμειξης των δύο υγρών

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσέγγισης του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Οι μέθοδοι αυτές ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες : i) Αυτές που ακολουθούν τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας ii) Αυτές που βασίζονται στη θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους

Η παρούσα εργασία βασίζεται στην ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σήμερα μέθοδο σύμφωνα με την οποία υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δυο συνιστώσες μίας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων απαιτείται η επίλυση ενός συζευγμένου ζεύγους διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιείται το λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι : i) εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρευστού ii) εξίσωση κίνησης (γενικευμένος νόμος του Darcy) iii) εξίσωση διατήρησης της μάζας της διαλυμένης ουσίας iv) καταστατική εξίσωση πυκνότητας-συγκέντρωσης

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες θεωρούνται ισόθερμες, με αποτέλεσμα η πυκνότητα να εξαρτάται μόνο από τις μεταβολές της συγκέντρωσης. Μεταβολές του ιξώδους δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Μελετώνται περιορισμένοι υδροφορείς. Δημιουργούνται με τη βοήθεια του λογισμικού FEFLOW υδροφορείς με διαφορετική γεωμετρία ώστε να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας, συγκεκριμένα των κλίσεων πυθμένα και οροφής, στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις οριακές συνθήκες. Ο πυθμένας και η οροφή θεωρούνται αδιαπέρατα όρια. Στο ένα πλευρικό όριο (κατάντι όριο) εφαρμόζονται οριακές συνθήκες πρώτου τύπου, σε ότι αφορά τόσο την εξίσωση διατήρησης μάζας του ρευστού (προκαθορισμένη τιμή υδραυλικού φορτίου) όσο και την εξίσωση διατήρησης μάζας διαλυμένης ουσίας (προκαθορισμένη τιμή συγκέντρωσης). Ειδικά στην περίπτωση της συγκέντρωσης γίνεται χρήση ενός περιορισμού, βάσει του οποίου η οριακή συνθήκη πρώτου τύπου δεν ισχύει στο τμήμα του συνόρου όπου πραγματοποιείται εκροή προς τη θάλασσα. Αντ' αυτού απαιτείται απλώς η κλίση της συγκέντρωσης στην περιοχή αυτή να είναι μηδενική. Για τον έλεγχο της εγκυρότητας της μορφής αυτής της συνοριακής συνθήκης τροποποιήθηκε το πρόβλημα Henry και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του κλασσικού προβλήματος Henry. Στο απέναντι πλευρικό όριο (ανάντι όριο) τίθεται συνοριακή συνθήκη δεύτερου τύπου για την εξίσωση διατήρησης μάζας του ρευστού (προκαθορισμένη τιμή εισερχόμενης ειδικής παροχής) και συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου για την εξίσωση διατήρησης μάζας διαλυμένης ουσίας. Τα υπόλοιπα πλευρικά όρια θεωρούνται αδιαπέρατα.

Για την επιλογή των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων και του αριθμητικού σχήματος πραγματοποιούνται δοκιμές στον οριζόντιο υδροφορέα. Οι διαστάσεις και το αριθμητικό σχήμα που επιλέγεται εφαρμόζεται και στις υπόλοιπες γεωμετρίες υδροφορέων.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε μια γεωμετρία υδροφορέα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα, όπου φαίνεται η διακύμανση ορισμένων μεγεθών σε σχέση με τη μεταβολή της γεωμετρίας.

Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα, όπου φαίνεται η διακύμανση ορισμένων μεγεθών σε σχέση με τη μεταβολή της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι όριο για ορισμένες γεωμετρίες υδροφορέων.



## **Abstract**

In coastal aquifers, fresh water flows towards the sea floating above the heavier seawater. Under the fresh water there exists a body of seawater in the form of a wedge.

Two phenomena occur simultaneously in the contact region of fresh and seawater : i) Replacement of fresh water by denser marine water ii) Hydrodynamic dispersion of salt within the interface mixing zone

Various methods for simulation of seawater intrusion have been suggested in the literature. They are generally grouped into two broad categories as follows: i) The sharp interface approximation (moving or steady) ii) The variable density models with a wide interface zone separating the two fluids

The present thesis is based on the modern method, belonging to the second category, where two mixable fluids (two components of a single phase) are mixed because of hydrodynamic dispersion, with fluid density depending on concentration. A coupled differential equation system is obtained and is solved numerically using FEFLOW software, which is based on the finite element method. The governing equations are: i) mass balance equation of the fluid phase ii) momentum balance equation (generalized form of Darcy's law) iii) equation of solute mass conservation iv) equation of state iv) equation of state of the fluid density

In this thesis we have considered isothermal conditions, so that density depends only on the changes of concentration. Changes of viscosity are not considered here.

Confined aquifers are examined in this thesis. A variety of confined aquifers are created, using FEFLOW software, in order to examine the effect of the slope of aquifer's bottom and top to seawater intrusion and related phenomena.

Special reference must be made to the boundary conditions of the model. Aquifer's top and bottom considered as impermeable. Among the lateral boundaries, one of them corresponds to the seaside boundary, the opposite one corresponds to the inland boundary and the remaining two ones considered as impermeable. Along the inland boundary there is constant freshwater flux, which means second type boundary condition for flux and first type boundary condition for mass transport. Along the seaside boundary there is prescribed pressure, which means first type boundary condition for flux. Salt concentration is equal to seawater concentration on inflowing portions of the boundary. For outflowing portions the boundary condition becomes the slope of concentration isolines to be equal to zero (first type boundary condition with constraint). Fluid enters the aquifer with seawater concentration, but exits with aquifer's concentration. In order to verify the validity of the boundary conditions defined above, Henry's problem is modified and its results are compared with "standard" Henry's problem ones.

A lot of different dimensions of finite elements as well as three types of upwinding are tried on the horizontal aquifer. The size of finite elements and the type of upwinding chosen is used in all models included in this project.

The results of the simulation are presented in detail for every different geometry of the aquifers studied. In this thesis these models (and its results) are called basic models. Comparative diagrams of specific physical quantities of some of the basic models follow.

Finally, comparative diagrams are presented where it can be observed the variation of specific physical quantities, related to seawater intrusion, in relationship with the value of the freshwater influx across the inland boundary.

# 1.Εισαγωγή

## 1.1. Γενικά

Η υφαλμύρωση αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα των παράκτιων υδροφορέων, το οποίο εξαιτίας της ανθρωπογενούς επέμβασης διαρκώς εντείνεται. Για τη μελέτη ενός παράκτιου υδροφορέα συνδυάζονται οι μετρήσεις πεδίου, η φυσική προσομοίωση υπό κλίμακα (πειραματικές διατάξεις) και η μαθηματική προσομοίωση με χρήση υπολογιστή.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη περιορισμένων (υπό πίεση ) υδροφορέων και συγκεκριμένα της επίδρασης που έχει στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης η γεωμετρία των ορίων του περιορισμένου υδροφορέα. Η μελέτη πραγματοποιείται με μαθηματική προσομοίωση με υπολογιστή, με το λογισμικό FEFLOW.

Με τη βοήθεια του υπολογιστή δημιουργούνται ιδεατοί τρισδιάστατοι υδροφορείς, πρίσματα στο χώρο, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των μεταβολών των κλίσεων του πυθμένα και της οροφής του υδροφορέα στη ροή του υπόγειου νερού και στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

Η πορεία που ακολουθείται βασίζεται στη γενική μέθοδο προσέγγισης των φυσικών φαινομένων. Βάσει αυτής της προσέγγισης το πρώτο βήμα είναι η σε βάθος κατανόηση του φαινομένου. Τον προσδιορισμό του συνόλου των παραμέτρων και των συνιστωσών της φυσικής διεργασίας ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση. Οι προκύπτουσες εξισώσεις είναι συνήθως γενικευμένες και επομένως αρκετά σύνθετες. Του σταδίου αυτού έπεται η ανάπτυξη των μοντέλων. Δυστυχώς, ο σύνθετος χαρακτήρας της φυσικής πραγματικότητας επιβάλλει την υιοθέτηση απλοποιήσεων για τη δημιουργία και την επίλυση του μοντέλου. Οι απλοποιήσεις αυτές καθορίζουν το βαθμό της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των τελικών αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα εργασία δημιουργούνται μαθηματικά μοντέλα, που δεν περιγράφουν μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, και δεν χρησιμοποιείται κάποια πειραματική διάταξη. Ο έλεγχος της εγκυρότητας των απλοποιήσεων και των μεθόδων που υιοθετούνται γίνεται με σύγκριση με το πρόβλημα Henry. Δημιουργείται, δηλαδή, μία παραλλαγή του προβλήματος Henry με τις επιλεγμένες από τον μελετητή απλοποιήσεις και μεθόδους, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του «κλασσικού» προβλήματος Henry. Εφόσον η απόκλιση κρίνεται από τον μελετητή ικανοποιητικά μικρή, οι επιλεγμένες απλοποιήσεις και μέθοδοι εφαρμόζονται σε όλα τα μοντέλα της εργασίας.

Αφορμή για την παρούσα εργασία αποτέλεσε η δημοσιευμένη το 2007 εργασία «*Quasi-horizontal circulation cells on 3d seawater intrusion*» των Abarca , E. , J.Carrera , X.Sanchez-Villa [6].

## 1.2. Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αποτελείται συνολικά από ένδεκα κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην εργασία και παρατίθενται συνοπτικά τα θέματα που αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται θεωρητικά το φυσικό φαινόμενο της υφαλμύρωσης, οι δύο κύριες κατευθύνσεις που ακολουθούνται κατά τη μοντελοποίηση του και παρατίθενται οι βασικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στις δυνατότητες σχεδιασμού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων που δίνει το FEFLOW.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Καταρχήν παρατίθενται οι γενικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας και στη συνέχεια αναλύονται ορισμένα μεγέθη και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του προβλήματος υφαλμύρωσης και τα οποία θεωρήθηκαν «κρίσιμα σημεία», που χρήζουν ιδιαίτερης αναφοράς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται όλες οι διαφορετικές γεωμετρίες υδροφορέων που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Κάθε γεωμετρία παρουσιάζεται με κάτοψη, όψη και τομή.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στην προσομοίωση του υδροφορέα με το λογισμικό FEFLOW. Περιγράφονται ορισμένες έννοιες και μεγέθη με βασική σημασία για την προσομοίωση. Επιπλέον, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα στα επόμενα κεφάλαια.

Το έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται στον οριζόντιο υδροφορέα. Καταρχήν περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία επιλογής διαστάσεων πεπερασμένων στοιχείων (κάναβος) και αριθμητικού σχήματος. Ο κάναβος και το αριθμητικό σχήμα που επιλέγονται για τον οριζόντιο υδροφορέα χρησιμοποιούνται και για τους υπόλοιπους υδροφορείς. Στη συνέχεια διερευνάται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε ορισμένες παραμέτρους του προβλήματος.

Το όγδοο κεφάλαιο περιέχει αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε διαφορετική γεωμετρία υδροφορέα που εξετάζεται και δεδομένη εισερχόμενη παροχή στο ανάντι όριο. Τα μοντέλα του κεφαλαίου αυτού ονομάζονται, στην παρούσα εργασία, βασικά μοντέλα.

Στο ένατο κεφάλαιο παρατίθενται συγκριτικά γραφήματα ορισμένων μεγεθών από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των βασικών μοντέλων.

Στο δέκατο κεφάλαιο περιλαμβάνονται συγκριτικά αποτελέσματα από μερικές γεωμετρίες υδροφορέων, στις οποίες έγιναν δοκιμές για μεγαλύτερες τιμές εισερχόμενης παροχής.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## 2. Υφαλμύρωση σε παράκτιους υδροφορείς

### 2.1 Η υφαλμύρωση ως φυσικό φαινόμενο

Στους παράκτιους υδροφορείς το ελαφρύτερο γλυκό νερό (πυκνότητας  $\rho_f$ ) έρχεται σε επαφή με το βαρύτερο θαλάσσιο νερό (πυκνότητας  $\rho_s > \rho_f$ ) με αποτέλεσμα το πρώτο ουσιαστικά να επιπλέει επάνω στο δεύτερο. Σε όλες τις περιπτώσεις, κάτω από το γλυκό νερό υπάρχει ένα σώμα θαλασσινού νερού με τη μορφή σφήνας.

Η κίνηση του θαλάσσιου νερού και η δημιουργία της σφήνας είναι μια διαδικασία αρκετά σύνθετη. Στην πραγματικότητα οι δύο διαφορετικής πυκνότητας ρευστές φάσεις είναι αναμίξιμες, με συνέπεια τη δημιουργία μιας ζώνης επαφής μεταξύ τους. Αυτή η ζώνη επαφής παίρνει τη μορφή μιας μεταβατικής ζώνης, εντός της οποίας η πυκνότητα του αναμειγμένου νερού ποικίλει μεταξύ εκείνης του γλυκού νερού και εκείνης του θαλάσσιου.

Το πάχος της μεταβατικής ζώνης δεν είναι σταθερό αλλά ποικίλει, εξαρτώμενο άμεσα από τις φυσικές ιδιότητες του υδροφόρου σχηματισμού, το ιστορικό των αντλήσεων, την χρονική εξέλιξη και κατανομή της επιφανειακής τροφοδοσίας, τη δράση της παλίρροιας. Σε γενικές γραμμές έχει αποδειχθεί ότι συνθήκες μόνιμης ροής ελαχιστοποιούν το πλάτος της ζώνης. Αντίθετα, αυξανόμενης της μεταβλητότητας των παραγόντων που προαναφέρθηκαν, αυξάνεται το πλάτος της ζώνης, το μέγεθος της οποίας ποικίλει από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρων.

Στην πραγματικότητα κατά την επαφή των δύο ρευστών λαμβάνουν χώρα δύο ταυτόχρονες διαδικασίες στους παράκτιους υδροφορείς : η αντικατάσταση του γλυκού νερού από το πυκνότερο θαλάσσιο και η κίνηση των χλωριόντων εντός της ζώνης ανάμειξης των δύο υγρών, μέσω της συνδυαστικής δράσης των διαδικασιών της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεν διαδικασία της υδροδυναμικής διασποράς οφείλεται στην πολυπλοκότητα του πεδίου των τοπικών (μικροσκοπικών) ταχυτήτων και κατ' επέκταση στην ετερογένεια του πορώδους μέσου, η δε διάχυση στην τυχαία κίνηση των μορίων μέσα σε ένα ρευστό, η οποία δημιουργεί μια πρόσθετη μεταφορά μάζας από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης προς εκείνες χαμηλής συγκέντρωσης. Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι η κίνηση της διαλελυμένης ουσίας είναι πολύπλοκη και δεν πραγματοποιείται μόνο κατά την κατεύθυνση της ροής. Η μεταβολή της αλατότητας σε διεύθυνση κάθετη προς την ταχύτητα ροής, που καταλήγει σε μια ανάλογης κατεύθυνσης μεταβολή της πυκνότητας, είναι υπεύθυνη για μια προς την επιφάνεια κίνηση των χλωριόντων, στο κατώτερο όριο της διεπιφάνειας. Εντός της μεταβατικής ζώνης η ταχύτητα ροής δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Στο μεν ανώτερο όριο της η ταχύτητα ροής ταυτίζεται με εκείνη του σώματος του γλυκού νερού, στο δε κατώτερο όριο σχεδόν μηδενίζεται. Το πεδίο ροής στη μεταβατική ζώνη είναι υπεύθυνο για την επιστροφή διαλελυμένης ουσίας στη θάλασσα και ουσιαστικά για την ανακύκλωση του θαλάσσιου νερού.

Οι μέθοδοι προσέγγισης και μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρωσης ομαδοποιούνται στις εξής κατηγορίες :

Αυτές που ακολουθούν τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης).

Αυτές που βασίζονται στη θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους.

### 2.1.1. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης)

Η θεώρηση αυτή ακολουθείται στην περίπτωση που το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα. Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μια φάση χωριστά (Νάνου, 2003):

#### Εξισώσεις για το γλυκό νερό

Εξίσωση συνέχειας.

Εξίσωση κίνησης (Νόμος Darcy).

#### Εξισώσεις για το θαλάσσιο νερό

Εξίσωση συνέχειας.

Εξίσωση κίνησης (Νόμος Darcy).

**Άγνωστα μεγέθη που αναζητούνται είναι:**

Πίεση  $p$

Βάθος  $z$  της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας.

Ειδικές παροχές (ταχύτητες)  $q_f$  και  $q_s$  για το γλυκό και θαλάσσιο νερό αντίστοιχα.

Μία μέθοδος που αποτελεί την πρώτη προσέγγιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης και που βασίζεται στη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας είναι αυτή των Ghyben - Herzberg.

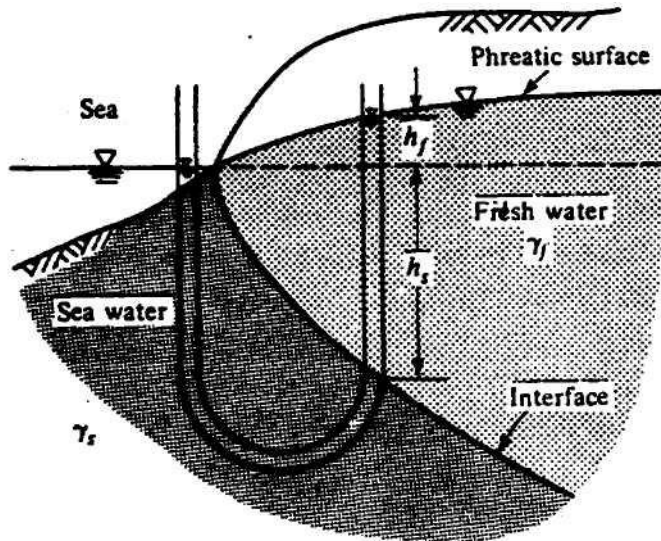
#### 2.1.1.1. Προσέγγιση GHYBEN - HERZBERG

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης εξετάστηκε για πρώτη φορά από τους Badon - Ghyben (1888) και Herzberg (1901), οι οποίοι προσπάθησαν να προσδιορίσουν τη σχέση μεταξύ του σχήματος και της θέσης της διεπιφάνειας, από τη μια πλευρά, και των διαφόρων παραμέτρων των υπογείων νερών σε παράκτιες περιοχές από την άλλη. Η προσέγγιση παρουσιάζει αρκετές ελλείψεις. Αναλύεται όμως για λόγους αρχής και συνέχειας, καθώς αποτελεί την πρώτη μαθηματικά διατυπωμένη και εμπεριστατωμένη μελέτη της υφαλμύρωσης.

Κυρίαρχο στοιχείο της προσέγγισης αυτής είναι η θεώρηση απότομης και ακίνητης διεπιφάνειας. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή Dupuit. Ορίζοντας  $h$ /το ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και  $h_s$  τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού -γλυκού νερού κάτω από αυτήν και  $\gamma_f$ ,  $\gamma_s$  τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα, ισχύει:

$$h_s \gamma_s = \gamma_f + h_s \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f \quad (2.1.1.1.1)$$

Η σχέση (2.1.1.1.1), γνωστή με το όνομα Ghyben - Herzberg, επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού μεταβάλλεται συνήθως από  $1.022 \text{ gr/cm}^3$  έως  $1.028 \text{ gr/cm}^3$ . Για  $\rho_f = 1.000 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_s = 1.025 \text{ gr/cm}^3$  υπολογίζεται ότι  $h_s = 40h_f$ . Τα σχήματα 2.4 και 2.5 απεικονίζουν τομές παράκτιων υδροφορέων, στους οποίους εφαρμόζεται η προσέγγιση Ghyben - Herzberg.



**Εικόνα 2.1.1.1.1:** Προσέγγιση Ghyben - Herzberg σε παράκτιο υδροφόρα (Πηγή: Bear J., 1979, [8])

Στη βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί αντίστοιχες γενικότερες εκφράσεις για δυναμική και όχι υδροστατική ισορροπία. Θεωρώντας το δυναμικό Hubbert (Bear J., 1979, [8]), η ακριβής θέση της διεπιφάνειας ζ τυχαίου σημείου P μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\zeta = (1 + \delta)\varphi_s - \delta\varphi_f \quad (2.1.1.1.2)$$

όπου  $\varphi_f$  και  $\varphi_s$  τα πιεζομετρικά φορτία στο P για το γλυκό και το αλμυρό νερό αντίστοιχα.

Στην πραγματικότητα, η προσέγγιση Ghyben - Herzberg δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας για τους εξής λόγους:

- A.** Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, ιδίως στις περιοχές πλησιέστερα προς τη θάλασσα.
- B.** Η προσέγγιση Ghyben - Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα .
- C.** Η διεπιφάνεια αλμυρού - γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- D.** Η προσέγγιση Ghyben - Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει την επιφάνεια διήθησης στην περίπτωση των φρεατίων υδροφορέων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση οριζόντιου ή κεκλιμένου, επίπεδου θαλάσσιου πυθμένα, οι ακριβείς λύσεις του προβλήματος δίνουν διεπιφάνεια η οποία καταλήγει πάντα στον θαλάσσιο πυθμένα, με κατακόρυφη επαφτομένη. Στην πραγματικότητα η διεπιφάνεια καταλήγει πάντα στον θαλάσσιο πυθμένα, σε κάποια απόσταση από την ακτή.

Παρά τις ανακρίβειες και τις παραδοχές, η εξίσωση Ghyben - Herzberg αποδεικνύεται ένα σημαντικό εργαλείο, που επιτρέπει με απλό τρόπο την κατά προσέγγιση εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού - γλυκού νερού. Εφόσον είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, μπορεί να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέρατο όριο του υδροφορέα ή εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν. Αντίστροφα, με δοκιμές και επιλογή κατάλληλου πάχους του υδροφορέα στην περιοχή της αλάτινης σφήνας, μπορεί να προσδιοριστεί το μήκος της.

### 2.1.2 Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους ή ζώνης μετάβασης

Κυρίαρχο ρόλο στην προσέγγιση αυτή παίζει η υδροδυναμική διασπορά. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δύο συνιστώσες μιας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς όπου η πυκνότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση.

**Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:**

Εξίσωση διατήρησης μάζας.

Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy).

Εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς.

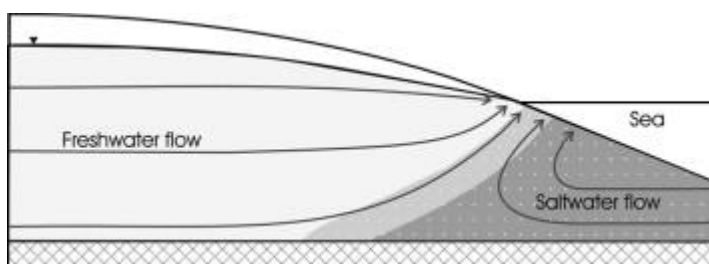
$\rho = \rho(c)$  (συνήθως γραμμική σχέση).

**Τα άγνωστα μεγέθη που αναζητούνται είναι:**

Ειδική παροχή (ταχύτητα)  $q$ .

Πίεση  $p$ .

Πυκνότητα  $\rho$  και συγκέντρωση  $c$



Εικόνα 2.1.2.1: Χαρακτηριστική εικόνα ζώνης μετάβασης ( Πηγή: Abarca E. et al (2007), [6] )



## 2.2.Τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης

Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε νερό σε συνδυασμό με την αλόγιστη χρήση και κατασπατάληση του σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές καθιστούν το φαινόμενο της υφαλμύρωσης πρωτεύον πρόβλημα. Η εύρεση άμεσης λύσης φαντάζει ως επιτακτική ανάγκη, ιδιαίτερα σε εκείνες τις περιοχές όπου οικονομικοί και λοιποί λόγοι, όχι μόνο δεν επιτρέπουν τη μείωση των αντλούμενων παροχών αλλά επιβάλλουν την αύξηση τους σε ούτως ή άλλως επιβαρημένες περιόδους του έτους. Η φύση του προβλήματος είναι τέτοια που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή διαχειριστικών μεθόδων για τη βέλτιστη χρήση του εναπομείναντος δυναμικού. Πέραν όμως της ορθολογικής διαχείρισης έχουν προταθεί και έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς διάφορες τεχνικές μέθοδοι περιορισμού της υφαλμύρωσης. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά οι ευρύτερα διαδεδομένες από αυτές:

i)Τεχνητός εμπλουτισμός, με στόχο την υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Ο τεχνητός εμπλουτισμός πραγματοποιείται με παροχέτευση γλυκού επιφανειακού νερού σε εκτεταμένες λεκάνες, τάφρους, κοίτες παλαιών ποταμών, φρέατα, από όπου και διηθείται στη συνέχεια στο έδαφος (εικόνα 2.2.1).

ii)Δημιουργία φραγμάτων, με στόχο την παρεμπόδιση της ελεύθερης διείσδυσης θαλάσσιου νερού (εικόνα 2.2.2 και 2.2.3).

iii)Απόληψη του αλμυρού και υφάλμυρου νερού, με στόχο τη μείωση της ποσότητας του βεβαρημένου νερού που διηθείται στον υδροφορέα (εικόνα 2.2.4).

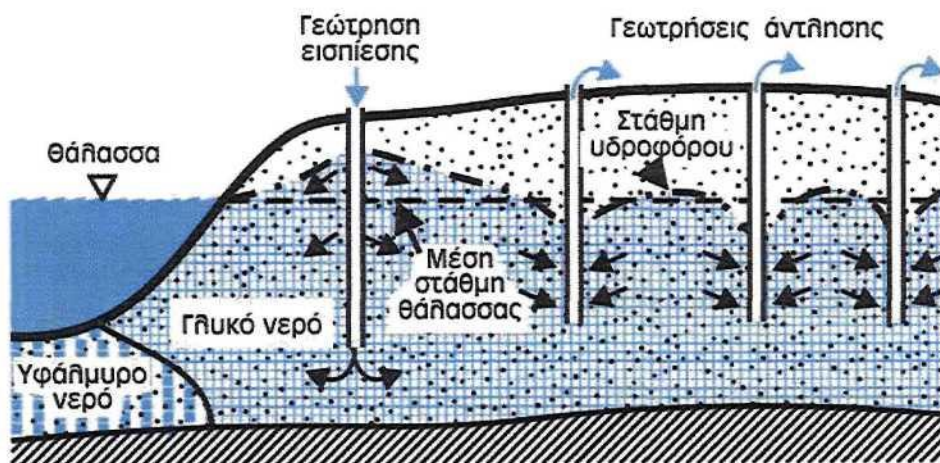
iv)Τεχνητή προέλαση της ξηράς προς την πλευρά της θάλασσας, με στόχο τη δημιουργία νέων φακών γλυκού νερού.

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι ή παραλλαγές αυτών εφαρμόζονται, πολλές φορές και συνδυαστικά, προκειμένου να διακοπεί επέκταση του φαινομένου της υφαλμύρωσης και όπου είναι αυτό δυνατόν, να αντιστραφεί. Ειδικά οι δύο τελευταίες μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης και εξετάζονται συνδυαστικά με σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η γενική αρχή όλων αυτών των μεθόδων είναι η διατήρηση ενός ελάχιστου πιεζομετρικού φορτίου, ικανού να παρεμποδίσει την προέλαση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Η τελική επιλογή της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες της περιοχής αλλά και από το κόστος εφαρμογής.

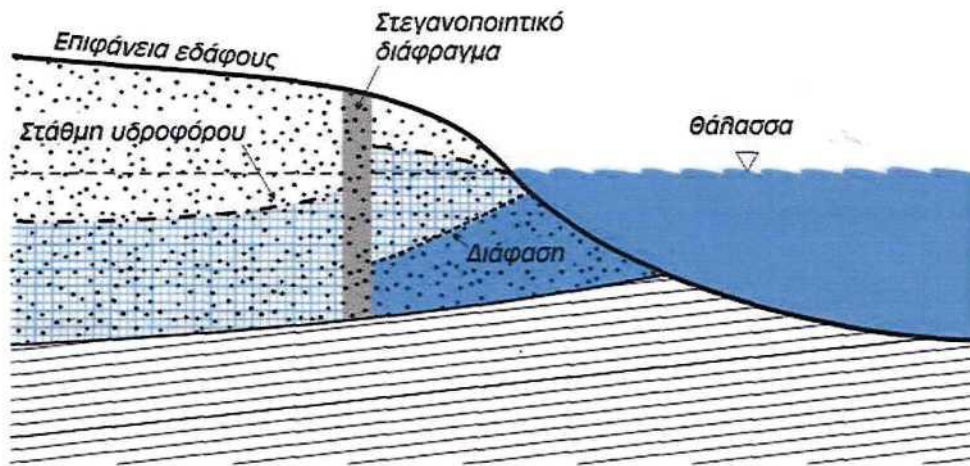
Η πλέον διαδομένη μέθοδος αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης είναι αυτή του τεχνητού εμπλουτισμού. Η εφαρμογή της απαιτεί ενδελεχή μελέτη του συστήματος των υπογείων νερών από υδραυλική, υδρογεωλογική και υδρολογική άποψη. Καθοριστικός στην περίπτωση αυτή είναι ο ρόλος της υδραυλικής επικοινωνίας, αφ' ενός μεν μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, αφ' ετέρου δε μεταξύ των διαφόρων επάλληλων στρωμάτων του υπόγειου νερού. Κατακόρυφες ρηγματώσεις και λοιπές γεωλογικές ασυνέχειες δημιουργούν πρόσθετα προβλήματα.

Όσον αφορά το νερό που χρησιμοποιείται για τον τεχνητό εμπλουτισμό των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές. Αρκετές φορές το νερό προέρχεται από ποταμούς, σε κάποια θέση των οποίων κατασκευάζεται φράγμα και δημιουργείται ταμιευτήρας. Το νερό των ταμιευτήρων αυτών παροχετεύεται σε κατάλληλες ποσότητες στο έδαφος. Σε ορισμένες περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση νερού προερχόμενου από βιολογικούς καθαρισμούς, εφόσον όμως πληρούνται οι προδιαγραφές που αφορούν στην ποιότητα του, ώστε να μην επιβαρυνθούν τα υπόγεια νερά με πρόσθετους ρύπους.

Παραδείγματα από την εφαρμογή των μεθόδων αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης υπάρχουν πολλά παγκοσμίως. Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στις Η.Π.Α., στις οποίες το 1999 αριθμούνταν περισσότερα από 600 φρέατα εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων. Σημαντικά έργα εμπλουτισμού έχουν πραγματοποιηθεί και στην Κύπρο, κυρίως την τελευταία δεκαπενταετία (στις περιοχές Γερμασόγεια, Ξηροπόταμος, Κουρής κ.λ.π.). Στην Ελλάδα έχουν γίνει στο παρελθόν απόπειρες εμπλουτισμού σε περιοχές με έντονη διείσδυση της θάλασσας, απαιτείται όμως πιο οργανωμένη προσπάθεια, κυρίως στο νησιωτικό χώρο.



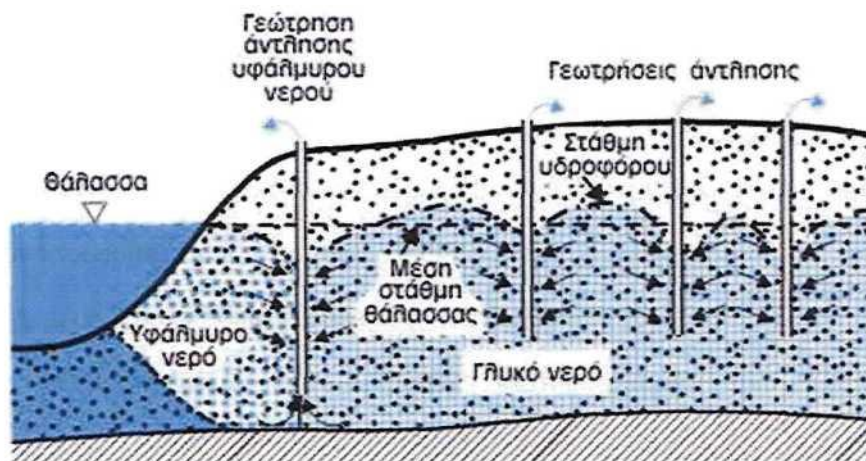
**Εικόνα 2.2.1:** Δημιουργία φραγμού από τεχνητό εμπλουτισμό κοντά στην ακτή (Πηγή: Σούλιος Γ.[30])



Εικόνα 2.2.2: Δημιουργία στεγανοποιητικού διαφράγματος κοντά στην ακτή (Πηγή: Σούλιος Γ.[30])



Εικόνα 2.2.3: Σχηματικό διάγραμμα ενός υπόγειου διαφράγματος, για την παρεμπόδιση ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού, σε παράκτιο καρστ (Πηγή: Σούλιος Γ.[30])



Εικόνα 2.2.4: Δημιουργία φραγμού από υπεράντληση κοντά στην ακτή (Πηγή: Σούλιος Γ.[30])

### 3. Πεπερασμένα στοιχεία : βασική ιδέα , σχεδιασμός στο λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW

#### 3.1. Βασική ιδέα

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται προκειμένου να προσεγγιστεί ένα συνεχές πεδίο, το οποίο απαιτεί μια απειρία τιμών για να καθοριστεί με ακρίβεια. Έστω μια ανεξάρτητη του χρόνου εξίσωση:

$$Lu = f \text{ στο } B \quad (3.1.1)$$

όπου  $B$  είναι ένας περιορισμένος χώρος,  $L$  είναι διαφορικός τελεστής, ο οποίος δρα στην άγνωστη συνάρτηση  $u$  για να προκύψει η γνωστή συνάρτηση  $f$ . Βάσει της μεθόδου των σταθμισμένων υπολοίπων, η εξίσωση παραμετροποιείται και αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο σύνολο συναρτήσεων  $\hat{u}$  της μορφής (κεφ.7, [19]) :

$$\hat{u}(x) = \sum_{j=1}^M \omega_j \varphi_j(x) \quad (3.1.2)$$

όπου  $x = (x_i, x_j, x_z)$  το διάνυσμα των συντεταγμένων,  $\varphi_j$  οι συναρτήσεις βάσης και  $\omega_j$  είναι άγνωστες παράμετροι. Έστω το υπόλοιπο:

$$R(x) = L\hat{u} - f(x) = L \left[ \sum_{j=1}^M \omega_j \varphi_j(x) \right] - f(x) \quad (3.1.3)$$

Οι ακριβείς λύσεις θα οδηγούσαν σε μηδενισμό του υπολοίπου. Με βάση τη μέθοδο αυτή (weighted residuals) επιχειρείται μηδενισμός της σχέσης (3.1.3) μέσω της κατάλληλης επιλογής των συντελεστών  $\omega_j$ . Οι τελευταίοι υπολογίζονται έτσι ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς που προκύπτουν από το μηδενισμό των σταθμισμένων ολοκληρωμάτων των υπολοίπων:

$$\int_{\Omega} R(x) w_i(x) dx = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (3.1.4)$$

όπου  $w_i$  είναι συναρτήσεις βάρους.

Στη μέθοδο Galerkin, η οποία είναι μια από τις ευρύτερα σήμερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους, οι συναρτήσεις βάρους  $w_j$  επιλέγονται να είναι ίδιες με τις βασικές συναρτήσεις, δηλαδή  $w_i(x) = \varphi_i(x)$ . Επομένως, η εξίσωση (3.1.4) παίρνει τη μορφή:

$$\int_{\Omega} R(x) \varphi_j(x) dx = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (4.5)$$

Προκύπτει επομένως ένα σύστημα  $M$  εξισώσεων, από το οποίο υπολογίζονται οι  $M$  το πλήθος άγνωστες παράμετροι  $\omega_j$ .

### **3.2. Σχεδιασμός και δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW**

Τον προσδιορισμό και οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος ακολουθεί η δημιουργία του δικτύου. Το FEFLOW παρέχει τη δυνατότητα άμεσης, αυτόματης δημιουργίας δικτύου ή σταδιακού σχεδιασμού του. Στην τελευταία αυτή περίπτωση ο χρήστης έχει μεγαλύτερη ελευθερία και του δίνεται η δυνατότητα παρέμβασης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης τα αποτελέσματα υπολογίζονται για κάθε κόμβο του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια επεκτείνονται στο σύνολο του κάθε στοιχείου με μεθόδους παρεμβολής. Αυξανόμενη της πυκνότητας του δικτύου αυξάνεται τόσο η ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο όμως και ο υπολογιστικός φόρτος. Οι απαιτήσεις στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων, ειδικά σε σχέση με την ακρίβεια και αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων και τα διαθέσιμα χρονικά περιθώρια ολοκλήρωσης του μοντέλου καθορίζουν τις ισορροπίες που θα κρατηθούν κατά τη δημιουργία του δικτύου.

Το πρώτο βήμα κατά τη δημιουργία δικτύου είναι η επιλογή του σχήματος των πεπερασμένων στοιχείων, που με τη σειρά του εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Για δισδιάστατα προβλήματα υπάρχει δυνατότητα επιλογής στοιχείων τριγωνικού ή τετραπλευρικού σχήματος. Για τρισδιάστατα προβλήματα διατίθενται τα αντίστοιχα σχήματος πρίσματα. Όσον αφορά στους κόμβους, εκτός από τις κορυφές των πρισμάτων δίνεται η δυνατότητα να οριστούν και στα μέσα των ακμών, οπότε αυξάνεται η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων, απαιτείται όμως μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ.

Το λογισμικό πρόγραμμα FEFLOW, ανάλογα με τη γεωμετρία του στοιχείου που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί, δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής τριών διαφορετικών γεννητριών δικτύου (mesh generator) : μέθοδος transport mapping για στοιχεία σχήματος τετραπλεύρου, μέθοδος advancing front για τριγωνικά στοιχεία και μέθοδος TMesh για τριγωνικά στοιχεία με δυνατότητα πύκνωσης κοντά στα όρια και σε επιλεγμένα σημεία ή γραμμές στο εσωτερικό του μελετώμενου πεδίου.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται προβλήματα τριών διαστάσεων. Για τη δημιουργία δικτύου επιλέχθηκαν στοιχεία σχήματος τετράπλευρου και συνεπώς η γεννήτρια δικτύου transport mapping.

Ο κάνναβος δημιουργήθηκε εφαρμόζοντας την επιλογή «generate gradually». Σύμφωνα με αυτή, ο μελετητής ορίζει σε κάθε όριο του μελετώμενου πεδίου, που μπορεί να είναι υποπεριοχή ολόκληρου του μοντέλου, τον αριθμό των κόμβων και στη συνέχεια η γεννήτρια δικτύου δημιουργεί τον κάνναβο.

### 3.2.1. Κινούμενα τρισδιάστατα δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων

Η ενότητα αυτή βασίζεται στο δεύτερο κεφάλαιο του συνοδευτικού εγχειρίδιου του λογισμικού FEFLOW «Reference manual» [11].

Το λογισμικό FEFLOW, για την επίλυση φρεάτιων υδροφορέων, χρησιμοποιεί κινούμενο κάρναβο, ο οποίος ορίζεται από τα όρια και την ελεύθερη επιφάνεια. Η ελεύθερη επιφάνεια αφενός είναι ως προς τη θέση άγνωστη, αφετέρου μεταβάλλεται με το χρόνο για μη μόνιμη ροή.

Η χρήση κινούμενου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, παρά τα πλεονεκτήματά της, καταλήγει σε πρόβλημα με μη γραμμικές οριακές συνθήκες, λόγω της εκ των προτέρων άγνωστης ελεύθερης επιφάνειας. Για τη λύση του προβλήματος χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες αριθμητικές μέθοδοι. Ανάλογα με το υπολογισμένο υδραυλικό φορτίο προσαρμόζεται το δίκτυο σε κάθε χρονικό βήμα. Στην εκάστοτε θέση του δικτύου όμως απαιτείται υπολογισμός και προσαρμογή των χωρικά μεταβαλλόμενων στοιχείων και παραμέτρων. Για παράδειγμα, η κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας μέσω στρωματοποιημένου υδροφόρου ορίζοντα απαιτεί την προσαρμογή των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των συντελεστών αποθηκευτικότητας, σε κάθε χρονικό βήμα. Το λογισμικό FEFLOW παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης αυτής της προσαρμογής με χρήση της μεθόδου BASD (Best - Adaptation - to - Stratigraphic - Data). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την προσαρμογή των επιφανειών των στρώσεων στις επιφάνειες ασυνέχειας των παραμέτρων, την κατανομή των υπολοίπων επιφανειών αναλογικά με το πάχος των στρώσεων με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης κατά βάθος απόστασης των στοιχείων του δικτύου, την προσαρμογή των παραμέτρων στις περιπτώσεις που οι στρώσεις του δικτύου δεν συμπίπτουν με την υπάρχουσα στρωματογραφία.

Με ανάλογη μέθοδο αντιμετωπίζονται και οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η άνοδος ή η πτώση της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα ενεργοποιεί ρύπους και κατ' επέκταση αρχικές οριακές συνθήκες μεταφοράς μάζας. Αν η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου προσεγγίσει τη θέση του ρύπου ενεργοποιούνται διαφορετικές αρχικές συνθήκες μεταφοράς μάζας. Αν κατά την προσέγγιση της συγκεκριμένης θέσης η υπολογισμένη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι ήδη μεγαλύτερη δεν παρατηρούνται περαιτέρω αλλαγές. Πιθανή πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στη συνέχεια θα μεταφέρει τους ρύπους σε υποκείμενες περιοχές λιγότερο βεβαρημένες.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται περιορισμένοι υδροφορείς και οι συνοριακές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε δεν παρουσιάζεται ελεύθερη επιφάνεια. Για το λόγο αυτό δεν γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη συγκεκριμένη μέθοδο.

## 4. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της υφαλμύρωσης

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται καταρχήν οι γενικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας και στη συνέχεια αναλύονται ορισμένα μεγέθη και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του προβλήματος υφαλμύρωσης και τα οποία θεωρήθηκαν «κρίσιμα σημεία», που χρήζουν ιδιαίτερης αναφοράς.

### 4.1. Γενικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας (κεφ.9,[5])

#### 4.1.1. Εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρευστού

Η εξίσωση συνέχειας για το ρευστό έχει την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho q_i) = \rho Q_\rho \quad (4.1.1.1)$$

$q_i$  : η ειδική παροχή [ $LT^{-1}$ ]

$\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού [ $ML^{-3}$ ]

$n$  : το πορώδες του εδάφους

$Q_\rho$  : ο ρυθμός ροής (εκφρασμένος σε μονάδες όγκου που εισέρχεται στη μονάδα του χρόνου), ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου ορίζοντα [ $T^{-1}$ ]. Αυτός ο όρος περιλαμβάνει το σύνολο των εισροών και εκροών από την επιφάνεια και τη βάση του υδροφόρου σχηματισμού.

Εισάγοντας τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, σύμφωνα με μία καταστατική εξίσωση πυκνότητας ρευστού – συγκέντρωσης διαλυμένης ουσίας,  $\rho(C)$ , η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}(C) \quad (4.1.1.2)$$

$S_o$  : η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, η οποία εκφράζει τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται ή προσλαμβάνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης ή αύξησης του πιεζομετρικού φορτίου [ $L^{-1}$ ]

$Q_{EB}(C)$  : είναι ο όρος εκείνος στον οποίο ενσωματώνονται οι επιδράσεις της μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Ο όρος αυτός θεωρείται ίσος με το μηδέν στην προσέγγιση Boussinesq ενώ χρησιμοποιείται κανονικά αν επιλεγεί η εκτεταμένη προσέγγιση Boussinesq (βλέπε ενότητα 4.2.2).

#### 4.1.2. Εξίσωση Darcy

Η εξίσωση του Darcy περιγράφει την κίνηση ενός ρευστού σε ένα πορώδες μέσο σε μακροσκοπικό επίπεδο και επομένως αποτελεί την εξίσωση κίνησης. Η εξίσωση του Darcy σε περιπτώσεις συνδυασμού της κίνησης ενός ρευστού με μεταφορά μάζας ρύπου, όπου μπορεί να μεταβάλλεται η πυκνότητα συναρτήσει της συγκέντρωσης, διατυπώνεται ως εξής:

$$q_i = -K_{ij} \left( \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} e_j \right) \quad (4.1.2.1)$$

$q_i$  : η ειδική παροχή [ $LT^{-1}$ ]

$K_{ij}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]

$\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού [ $ML^{-3}$ ]

$e_j$  : το μοναδιαίο κατακόρυφο διάνυσμα

#### 4.1.3. Εξίσωση διατήρησης μάζας της διαλυμένης ουσίας

$$\frac{\partial}{\partial t}(nC) + \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C - D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) = Q_c \quad (4.1.3.1)$$

με

$$D_{ij} = D_{ij}^{mol} + D_{ij}^{disp} = D_{ij}^{mol} + (D_{Lij}^{disp} + D_{Tij}^{disp}) = D_{ij}^{mol} + (\beta_L \nu + \beta_T \nu) \quad (4.1.3.2)$$

$D_{ij}^{disp}$  : ο τανυστής της μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{ij}^{mol}$  : ο τανυστής της μοριακής διάχυσης [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{Lij}^{disp}$  : ο επιμήκης συντελεστής μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_{Tij}^{disp}$  : ο εγκάρσιος συντελεστής μηχανικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

$\beta_L$  : ο ανηγμένος επιμήκης συντελεστής μηχανικής διασποράς [L]

$\beta_T$  : ο ανηγμένος εγκάρσιος συντελεστής μηχανικής διασποράς [L]

$\nu$  : η μέση ταχύτητα ροής [ $LT^{-1}$ ]

$Q_c$  : το αλγεβρικό άθροισμα όλων των δυνατών μηχανισμών απώλειας ή προσθήκης διαλυμένης ουσίας [ $ML^{-3}T^{-1}$ ]



Η παραπάνω μορφή της εξίσωσης διατήρησης μάζας διαλυμένης ουσίας αποκαλείται “divergent form of transport equation”. Αναπτύσσοντας την παραπάνω εξίσωση και αντικαθιστώντας από την εξίσωση διατήρησης μάζας του ρευστού (εξίσωση 4.1.1.1 ή 4.1.1.2) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(nC) + q_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) = Q_c - CQ_\rho \quad (4.1.3.3)$$

Η μορφή αυτή αποκαλείται “convective form of transport equation” και χρησιμοποιείται συχνότερα στη μοντελοποίηση. Οι δύο μορφές είναι ισοδύναμες ως προς την περιγραφή της φυσικού φαινομένου της μεταφοράς μάζας διαλυμένης ουσίας, αλλά ανάλογα με την μορφή, που επιλέγεται από τον μελετητή, διαφοροποιείται ο τρόπος που τίθενται οι συνοριακές συνθήκες.

## 4.2.Ειδικά θέματα

### 4.2.1 Ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο γλυκού νερού (κεφ.7.2, [13])

Κατά τη διαμόρφωση και επίλυση ενός προβλήματος υπόγειας ροής συχνά απαιτείται το υδραυλικό φορτίο να παίρνει μία συγκεκριμένη τιμή σε μία περιοχή του μοντέλου (συνοριακή συνθήκη) . Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας , είναι η διείδυση άλατος από τη θάλασσα και η υφαλμύρωση ενός παράκτιου υδροφορέα . Η διεπαφή του υδροφορέα με τη θάλασσα (σύνορο-θάλασσα) προσομοιώνεται ως μία περιοχή με καθορισμένη κατανομή υδραυλικού φορτίου, συγκεκριμένα ως μία κατακόρυφη επιφάνεια όπου επικρατούν υδροστατικές συνθήκες .

Συγκεκριμένα , το υδραυλικό φορτίο  $h$  πρέπει να ορίζεται σε μία πυκνότητα αναφοράς του ρευστού  $\rho_o$  .

$$h = \frac{p}{\rho_o g} + z \quad (4.2.1.1)$$

$h$  το υδραυλικό φορτίο [L]

$p$  η πίεση [ML<sup>-1</sup>T<sup>-2</sup>]

$\rho_o$  η πυκνότητα αναφοράς [ML<sup>-3</sup>]

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [MLT<sup>-2</sup>]

$z$  το υψόμετρο [L]

Συνήθως για τα προβλήματα υφαλμύρωσης ως πυκνότητα αναφοράς επιλέγεται η πυκνότητα του γλυκού νερού ( $\rho_o=1 \text{ kg/lit}$ ) .

Η μέτρηση του πιεζομετρικού φορτίου με ένα πιεζόμετρο κανονικά συσχετίζεται με την πραγματική πυκνότητα του νερού (διαλύματος) στο σημείο αυτό . Το υδραυλικό φορτίο δίνεται από τη σχέση :

$$h_s = \frac{P}{\rho_s g} + z \quad (4.2.1.2)$$

$\rho_s$  η πυκνότητα του νερού (διαλύματος) για μία συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας C :  $\rho_s = \rho_s(C)$

Πρέπει να γίνει σαφές ότι είναι σφάλμα να εισαχθεί η τιμή  $h_s$  απευθείας ως συνοριακή συνθήκη. Αντ ' αυτού πρέπει να μετασχηματιστεί σε υδραυλικό φορτίο της πυκνότητας αναφοράς. Πρέπει να βρεθεί , δηλαδή, το ισοδύναμο φορτίο γλυκού νερού και αυτό να εισαχθεί ως συνοριακή συνθήκη . Από την (4.2.1.2) έχουμε

$$h_s = \frac{P \rho_o}{\rho_o \rho_s g} + z \quad (4.2.1.3)$$

Αντικαθιστώντας από την (4.2.1.1) έχουμε

$$h = \frac{\rho_s}{\rho_o} h_s - \left( \frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \right) z \quad (4.2.1.4)$$

Ορίζεται ο συντελεστής διαφοράς πυκνότητας  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \quad (4.2.1.5)$$

Οπότε η (4.1.5) γράφεται

$$h = (1 + \alpha) h_s - \alpha z \quad (4.2.1.6)$$

Οι εξισώσεις (4.2.1.4) ή (4.2.1.6) πρέπει να χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο γλυκού νερού  $h$  ενός γνωστού υδραυλικού φορτίου  $h_s$  , το οποίο έχει μετρηθεί σε νερό γνωστής πυκνότητας  $\rho_s$  (γνωστής συγκέντρωσης άλατος C).

Τέλος, πρέπει να τονιστεί (κεφ. 3.2, [2]) ότι και τα υδραυλικά φορτία που επιστρέφονται ως αποτελέσματα από την εκτέλεση του μοντέλου στο λογισμικό FEFLOW είναι και αυτά ισοδύναμα φορτία γλυκού νερού . Αντιπροσωπεύουν, δηλαδή, τη μέτρηση που θα λαμβανόταν από ένα πιεζόμετρο όπου με κατάλληλο μηχανισμό θα εξασφαλιζόταν η ύπαρξη μόνο γλυκού νερού. Για να υπολογιστεί η στάθμη που, βάσει των αποτελεσμάτων, θα φτάνει το νερό σε ένα πιεζόμετρο πληρωμένο με νερό του σημείου τοποθέτησής του η εξίσωση (4.2.1.6) πρέπει να λυθεί ως προς  $h_s$ :

$$h_s = \frac{1}{1+a} h + \frac{a}{1+a} z \quad (4.2.1.7)$$

#### **4.2.2. Η προσέγγιση Boussinesq και η διάκριση μεταξύ της μορφής convective και divergence των εξισώσεων μεταφοράς της διαλυμένης ουσίας (convective and divergence form of transport equations)**

Όταν μελετάται η ροή ενός ρευστού σε συνδυασμό με τη μεταφορά μιας διαλυμένης σε αυτό ουσίας (coupled flow and transport), γενικά λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στην πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού. Στην παρούσα εργασία η επίδραση της συγκέντρωσης στο ιξώδες θεωρείται αμελητέα. Η επίδραση της συγκέντρωσης στην πυκνότητα περιγράφεται από μία συνάρτηση  $\rho(C)$  και αντίστοιχα οι μεταβολές (κλίσεις) της πυκνότητας επηρεάζουν τις εξισώσεις που αφορούν το ρευστό. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει αποδειχθεί πολύ σημαντική για φαινόμενα υφαλμύρωσης. Χωρίς τον συνυπολογισμό της, τα αποτελέσματα απέχουν πολύ από τα δεδομένα των πειραμάτων και των επί τόπου ερευνών. Ωστόσο, κατά τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος εμφανίζεται μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων για την επίλυση του οποίου υιοθετούνται κάποιες απλοποιήσεις.

Η συνήθης απλοποίηση είναι η προσέγγιση Boussinesq. Σύμφωνα με την απλοποίηση αυτή, στην εξίσωση διατήρησης μάζας του ρευστού (4.1.1.2) αμελείται ο όρος εκείνος στον οποίο ενσωματώνονται οι επιδράσεις της μεταβαλλόμενης πυκνότητας ( $Q_{EB}(C)$ ).

Υπάρχει επίσης η «εκτεταμένη προσέγγιση Boussinesq» (“extended Boussinesq approximation”). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, η ποσότητα  $Q_{EB}(C)$  συμπεριλαμβάνεται κανονικά στην εξίσωση (4.1.1.2). Η προσέγγιση αυτή, εφόσον περιλαμβάνει λιγότερες απλοποιήσεις, θεωρείται ακριβέστερη.

Στο λογισμικό FEFLOW, στο menu “options” μπορεί να επιλεγεί απλή (default) ή extended Boussinesq approximation και convective ή divergence form of transport. Πρέπει να τονιστεί ότι η απλή προσέγγιση Boussinesq συνδυάζεται με την επιλογή convective form of transport. Η εκτεταμένη προσέγγιση Boussinesq καλό είναι να συνδυάζεται με την επιλογή divergence form of transport. Ο συνδυασμός εκτεταμένης προσέγγισης Boussinesq και convective form of transport εξασφαλίζει ένα ενδιάμεσο επίπεδο ακρίβειας [20].

Τέλος, σημειώνεται ότι η προσέγγιση Boussinesq είναι δυνατόν να έχει ως αποτέλεσμα αποκλίσεις στην καθετότητα ισοδυναμικών και διανυσμάτων της ταχύτητας και ότι για τα αποτελέσματα της κατανομής συγκέντρωσης έχει παρατηρηθεί απόκλιση 9% μεταξύ απλής και εκτεταμένης προσέγγισης Boussinesq.

#### 4.2.3.Οι επιλογές convective & divergence form of transport του menu “Options” και ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών

Η επιλογή μεταξύ convective ή divergence form of transport επηρεάζει τον τρόπο που θα τεθούν οι συνοριακές συνθήκες αναφορικά με τη διαλυμένη ουσία . Για την εξίσωση διατήρησης μάζας (συγκέντρωσης) της διαλυμένης ουσίας χρειάζεται να οριστούν και οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες σε μία περιοχή ( σε ένα υποσύνολο σημείων –πεπερασμένων στοιχείων ) του μοντέλου . Οι συνοριακές συνθήκες χωρίζονται στο λογισμικό FEFLOW σε τέσσερις κατηγορίες , πρώτου , δεύτερου, τρίτου και τέταρτου τύπου . Γίνεται αναφορά στις δύο πρώτες που εμφανίζονται στο παρόν πρόβλημα( σελ.63,[11]).

Η συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου ( Dirichlet ) είναι η συγκέντρωση στο σημείο  $x_i$  να λαμβάνει τιμές από μία προκαθορισμένη συνάρτηση του χρόνου  $t$ .

$$C(x_i, t) = C_1^R \quad (4.2.3.1)$$

Η συνοριακή συνθήκη δεύτερου τύπου ( Neumann) αναφέρεται στο μέγεθος « ροή μάζας» (“mass flux”) . Στο λογισμικό FEFLOW και σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες το μέγεθος «ροή μάζας (mass flux) » ορίζεται ως εξής :

$$\text{convective form: } q_{n_c}(x_i, t) = q_1^R(t) = -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} n_i \quad (4.2.3.2)$$

$$\text{divergence form: } q_{n_c}(x_i, t) = q_2^R(t) = C_2^R q_{n_h} - D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} n_i \quad (4.2.3.3)$$

$q_{n_c}$  : ροή μάζας κάθετη στο σύνορο [ $ML^{-2}T^{-1}$ ]

$q_{n_h}$  : ταχύτητα Darcy κάθετη στο σύνορο [ $LT^{-1}$ ]

$n_i$  : μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο σύνορο

$D_{ij}$  : τανυστής της υδροδυναμικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]

Η παραπάνω εξίσωση-διατύπωση σημαίνει το εξής: Αν στο menu “options” έχει επιλεγεί “convective form of transport” , τότε στη θέση του μεγέθους “mass flux” (της συνοριακής συνθήκης Neumann) πρέπει να εισαχθεί από τον χρήστη η τιμή που επιθυμεί να έχει στο σύνορο η ροή μάζας λόγω διασποράς . Αν στο menu “options” έχει επιλεγεί “divergence form transport” , τότε στη θέση του μεγέθους “mass flux” (της συνοριακής συνθήκης Neumann) πρέπει να εισαχθεί από τον χρήστη η τιμή που επιθυμεί να έχει στο σύνορο η συνολική ροή μάζας (λόγω μεταγωγής και λόγω διασποράς) .

Στο FEFLOW δίνεται επίσης η δυνατότητα οι συνοριακές συνθήκες για την εξίσωση διατήρησης μάζας (συγκέντρωσης) της διαλυμένης ουσίας να ισχύουν μόνο όταν ότι ισχύουν κάποιοι περιορισμοί. Οι περιορισμοί αυτοί είναι τύπου μέγιστου /ελάχιστου για την τιμή ενός μεγέθους. Συγκεκριμένα, για τις συνοριακές συνθήκες πρώτου τύπου (Dirichlet) μπορούν να τεθούν περιορισμοί ως προς τη «ροή μάζας» ( mass flux) μας ή/και για το υδραυλικό φορτίο (head) (σελ .76-78,[13]).

Οι περιορισμοί μέγιστου-ελάχιστου της συνοριακής συνθήκης Dirichlet στην εξίσωση συγκέντρωσης οδηγούν σε «επιπρόσθετες συνθήκες» με την εξής μορφή : Εισάγεται στο μοντέλο η συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου , καθώς επίσης και οι περιορισμοί. Αν η «ροή μάζας»  $Q_c$  (ή το υδραυλικό φορτίο  $h$ ) είναι μέσα στο διάστημα μεταξύ ελάχιστου και μέγιστου όριου των περιορισμών , εφαρμόζεται η συνοριακή συνθήκη όπως έχει οριστεί . Αν όχι, τα όρια αυτά (των περιορισμών) χρησιμοποιούνται ως συνοριακές συνθήκες.

$$C(x_i, t) = C_1^R(t) \text{ μόνο αν } \begin{cases} Q_c^1 < Q_c^{\max_1}(t) \\ \text{και} \\ Q_c^1 > Q_c^{\min_1}(t) \\ \text{και} \\ h^{\min_1} \leq h_1 \leq h^{\max_1} \end{cases}$$

Αλλιώς η ποσότητα  $Q_c$  τίθεται ως περιορισμός ως εξής :

$$Q_c = Q_c^{\max_1}(t) \text{ αν } Q_c^1 \geq Q_c^{\max_1}(t) \text{ και } h^{\min_1} \leq h_1 \leq h^{\max_1}$$

$$Q_c = Q_c^{\min_1}(t) \text{ αν } Q_c^1 \leq Q_c^{\min_1}(t) \text{ και } h^{\min_1} \leq h_1 \leq h^{\max_1}$$

$$Q_c = 0 \text{ αν } h_1 < h^{\min_1} \text{ ή } h_1 > h^{\max_1} \quad (4.2.3.4)$$

Όπου  $C_1^R(t)$  είναι η συνοριακή συνθήκη Dirichlet για τη συγκέντρωση,  $Q_c^I$  είναι η υπολογιζόμενη ροή μάζας στο σύνορο σε κάθε βήμα της επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης και  $Q_c^{\max}, Q_c^{\min}$  είναι το μέγιστο και το ελάχιστο όριο του περιορισμού (Υπενθυμίζεται με τον όρο «ροή μάζας» μπορεί να εννοείται η ροή μάζας λόγω διασποράς ή η συνολική ροή μάζας ανάλογα με την επιλογή “convective” ή “divergence form of transport”).

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να υπολογίζεται η συγκέντρωση στο σύνορο σε συνάρτηση με τις συνθήκες ροής διάμεσου του συνόρου (π.χ.  $Q_c=0$ ) και ταυτόχρονα σε συνάρτηση με τη θέση της πιθανής ελεύθερης επιφάνειας ( $h_{\min}, h_{\max}$ ).

Τέλος, αναφορικά με τα πρόσημα των μεγεθών ταχύτητα Darcy και ροή μάζας (διαλυμένης ουσίας) πρέπει να παρατηρηθεί ότι για τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), οι εισροές (φορά διανύσματος προς το εσωτερικό του μοντέλου) εισάγονται με αρνητικό πρόσημο και οι εκροές με θετικό. Ωστόσο, κατά τον ορισμό των περιορισμών (constraints) που συνοδεύουν τις συνοριακές συνθήκες οι εισροές εισάγονται με θετικό πρόσημο και οι εκροές με αρνητικό (σελ. 57,[12]). Σημειώνεται, εν παρόδω, ότι στα αποτελέσματα που το λογισμικό επιστρέφει στο χρήστη οι εισροές δίνονται με αρνητικό πρόσημο και οι εκροές με θετικό.

#### **4.2.3.1. Συνοριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας της διαλυμένης ουσίας (αλάτι) στην παρούσα εργασία**

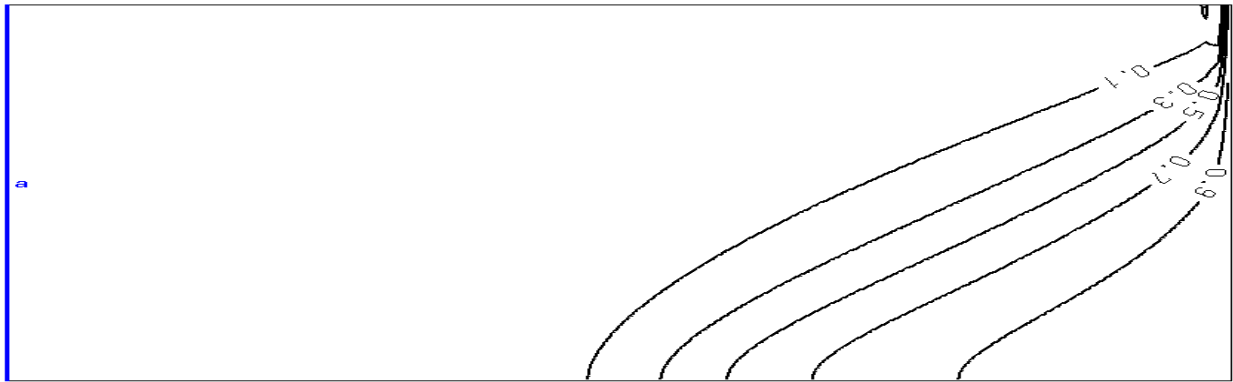
Στο ανάντι όριο του μοντέλου έχουμε εισροή γλυκού νερού, οπότε τίθεται συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου η συγκέντρωση να είναι ίση με το μηδέν.

Στο καταντι όριο του μοντέλου, σύνορο –θάλασσα, πραγματοποιείται εισροή αλμυρού (θαλασσινού) νερού σε μία περιοχή του συνόρου (την κατώτερη), κυκλοφορία νερού στην μεταβατική ζώνη (circulation cell), και έξοδος προς τη θάλασσα υφάλμυρου νερού από την ανώτερη περιοχή του συνόρου. Στο «κλασικό» διδιάστατο πρόβλημα υφαλμύρωσης, που υπάρχει ενσωματωμένο στο λογισμικό FEFLOW ( “Henry’s problem”), τίθεται συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου, η συγκέντρωση αλάτος να είναι ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό (22000mg/lit), στο κάτω 80% του συνόρου-θάλασσα και το άνω 20% αφήνεται ελεύθερο, χωρίς καμία συνοριακή συνθήκη. Η επιλογή του ποσοστού του συνόρου-θάλασσα που η αφήνεται συγκέντρωση τίθεται ίση με αυτή του θαλασσινού νερού είναι αυθαίρετη και προεξοφλεί την περιοχή εισροής. Ωστόσο, πειραματικά αποτελέσματα από οιονεί διδιάστατα προβλήματα δεν απέχουν πολύ από τα παραπάνω ποσοστά.

Η πιο σημαντική αιτία της αδυναμίας να επιλεγεί εκ των προτέρων η περιοχή εισροής στην παρούσα εργασία είναι ο τρισδιάστατος χαρακτήρας της ροής.

Για να επιλεγεί η μορφή της συνοριακής συνθήκης στο κατάντι όριο δημιουργήθηκαν και συγκρίθηκαν τρεις παραλλαγές του προβλήματος Henry. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις ισογραμμές της συγκέντρωσης:

i) Συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου ,η συγκέντρωση άλατος να είναι ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό (22000mg/lit) σε όλοκληρο το σύνορο-θάλασσα



Εικόνα 4.2.3.1.1. : Ισογραμμές της συγκέντρωσης της παραλλαγής (i) του προβλήματος Henry

Οι ισογραμμές παρουσιάζουν αρκετές αστάθειες κοντά στο σύνορο-θάλασσα .Το γεγονός ότι η συγκέντρωση παίρνει τη μέγιστη τιμή της σε όλοκληρο το σύνορο σημαίνει ότι η κλίση συγκέντρωσης είναι παντού προς το εσωτερικό του υδροφορέα και η εκροή είναι «αναγκασμένη» να πραγματοποιείται σε ένα οριακά μικρό τμήμα του συνόρου με σχετικά πολύ μεγάλες ταχύτητες .

ii) Συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου ,η συγκέντρωση άλατος να είναι ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό (22000mg/lit) , στο κάτω 70% του συνόρου-θάλασσα και το άνω 30% αφήνεται ελεύθερο , χωρίς καμία συνοριακή συνθήκη



Εικόνα 4.2.3.1.2. : Ισογραμμές της συγκέντρωσης της παραλλαγής (ii) του προβλήματος Henry

iii) Αξιοποίηση της δυνατότητας του FEFLOW να λαμβάνονται υπόψιν οι συνοριακές συνθήκες μόνο ικανοποιούνται κάποιοι περιορισμοί.

Αν στο menu “Options” έχει επιλεγεί convective form transport : Τίθεται ο περιορισμός “ min mass flux =0” .Ο περιορισμός αυτός σημαίνει ότι όπου η κλίση συγκέντρωσης (ή η ροή μάζας λόγω διασποράς) στο σύνορο-θάλασσα είναι προς το εσωτερικό του μοντέλου , η τιμή της συγκέντρωσης

άλατος παραμένει ίση με αυτή του αλμυρού νερού (22000 mg/lit) . Όπου όχι ,η κλίση συγκέντρωσης τίθεται ίση με μηδέν και η τιμή της συγκέντρωσης προκύπτει από την επίλυση .

Αν στο menu “Options” έχει επιλεγεί divergence form transport : Ο όποιος περιορισμός τίθεται για τη «συνολική» ροή μάζας (“total mass flux”) .Έστω ότι τίθεται ο περιορισμός “ min mass flux =0” .Ο περιορισμός αυτός σημαίνει ότι όπου η συνολική ροή μάζας είναι προς το εσωτερικό του μοντέλου , η τιμή της συγκέντρωσης άλατος στο σύνορο παραμένει ίση με αυτή του αλμυρού νερού (22000 mg/lit) . Όπου όχι ,η συνολική ροή μάζας τίθεται ίση με μηδέν. Θα μπορούσε η ποσότητα min mass flux να τεθεί ίση με μία τιμή διάφορη του μηδενός, ωστόσο η επιλογή της τιμής αυτής δεν είναι εύκολη.

Η επιλογή μεταξύ convective και divergence form of transport δεν είναι απλή, απαιτεί διερεύνηση γαι κάθε υπό εξέταση πρόβλημα και η τελική επιλογή χρειάζεται ίσως ενίσχυση από μετρήσεις πεδίου.

Στην παραλλαγή (iii) του προβλήματος Henry, στο μενού “Options” επιλέγεται “convective form of transport” και τίθεται συνοριακή συνθήκη πρώτου τύπου ,η συγκέντρωση άλατος να είναι ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό (22000mg/lit), σε ολόκληρο το σύνορο θάλασσα , υπό τον περιορισμό “min mass flux=0”.



Εικόνα 4.2.3.1.3. : Ισογραμμές της συγκέντρωσης της παραλλαγής (iii) του προβλήματος Henry

Τα αποτελέσματα των παραλλαγών (ii) & (iii) παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα. Υπενθυμίζεται ότι η περίπτωση (ii) είναι το «κλασσικό» πρόβλημα Henry που θεωρείται ένα χαρακτηριστικό μοντέλο για την περιγραφή της υφαλμύρωσης και τα αποτελέσματα του χρησιμοποιούνται ευρέως ως κριτήρια ορθότητας των διάφορων μοντέλων που περιγράφουν υπόγεια ροή με μεταβαλλόμενη πυκνότητα του ρευστού (σελ.203,[11]). Ωστόσο, σε τρισδιάστατα προβλήματα ο εκ των προτέρων διαχωρισμός των περιοχών εισροής και εκροής είναι πολύ πιο δύσκολος και μπορεί να επιφέρει σοβαρά σφάλματα στα τελικά αποτελέσματα. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν η συνοριακή συνθήκη και ο περιορισμός της παραλλαγής (iii).



## 5. Περιγραφή του προβλήματος

### 5.1.Υδροφορείς που μελετώνται

Θα μελετηθούν περιορισμένοι υδροφορείς στους οποίους οι διαστάσεις της κάτοψης τους είναι πολύ μεγαλύτερες από την κατακόρυφη διάσταση (πάχος) . Οι υδροφορείς χωρίστηκαν σε δύο ομάδες : α)υδροφορείς με σταθερό πάχος σε όλη τους την έκταση , β) υδροφορείς με μεταβαλλόμενο πάχος. Κάθε μια από τις ομάδες αυτές χωρίστηκε σε τέσσερις υποκατηγορίες :1) οριζόντιοι (horizontal), 2) επικλινείς προς τη θάλασσα (seawards sloping), 3)σχήματος V, που έχουν κλίση κατά τη διεύθυνση της ακτογραμμής (v-shaped), 4)«στρεβλοί», που έχουν κλίση και κάθετα και κατά τη διεύθυνση της ακτογραμμής(warped). Στους υδροφορείς αυτούς (εκτός από τον οριζόντιο) θα διερευνηθούν τα αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές κλίσεων.

Οι υδροφορείς έχουν σε κάτοψη τέσσερα όρια . Το όριο «ενδοχώρα» -ανάντι όριο, το όριο θάλασσα ,που αντιστοιχεί στην ακτογραμμή , και τα δύο πλευρικά όρια που θεωρούνται αδιαπέρατα . Σε τομή έχουν το πάνω και το κάτω όριο που θεωρούνται αδιαπέρατα.

Οι διαστάσεις όλων των υδροφορέων είναι σε κάτοψη  $10000 \times 5000 \text{ m}^2$  (10000m παράλληλα στην ακτογραμμή , 5000m κάθετα στην ακτογραμμή) . Ως προς το ύψος (πάχος) θα μελετηθούν υδροφορείς με σταθερό πάχος 50 m σε όλη τους την έκταση και υδροφορείς με πάχος σταδιακά μεταβαλλόμενο από 50m,στην πιο ρηχή περιοχή, έως 100m στην πιο βαθεία περιοχή τους . Οι τιμές αυτές αποτελούν χαρακτηριστικές τιμές διαστάσεων για παράκτιους υδροφορείς.

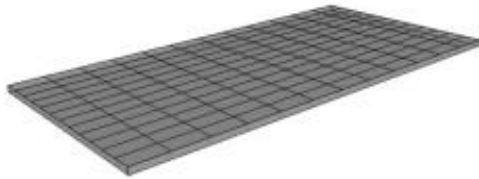
Επιπλέον, όλοι οι υδροφορείς σχεδιάστηκαν συμμετρικοί ως προς γραμμή κάθετη στην ακτογραμμή ώστε εμφανίζονται στο μέσο του υδροφορέα συνοριακές συνθήκες αδιαπέρατου ορίου.Είναι,δηλαδή, δυνατόν να προσομοιωθεί ο μισός υδροφορέας (διαστάσεις 5000m x5000m) και να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος .

Οι συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν είναι :

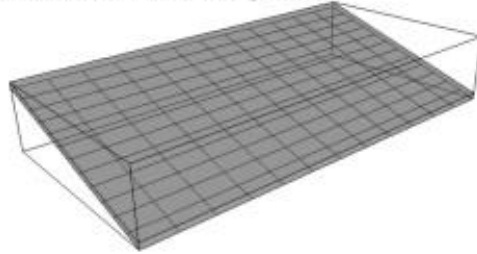
Στο ανάντι όριο σταθερή εισερχόμενη ειδική παροχή γλυκού νερού (συγκέντρωση άλατος μηδέν , πυκνότητα ρευστού  $1\text{g/cm}^3$ )

Στο όριο-θάλασσα πίεση ίση με αυτή των υδροστατικών συνθηκών, συγκέντρωση άλατος ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό ( $22000\text{mg/lit}$ ) και πυκνότητα ρευστού ίση με του θαλασσινού νερού ( $1.024 \text{ g/cm}^3$ ) , υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε εισροή από τη θάλασσα προς τον υδροφορέα.

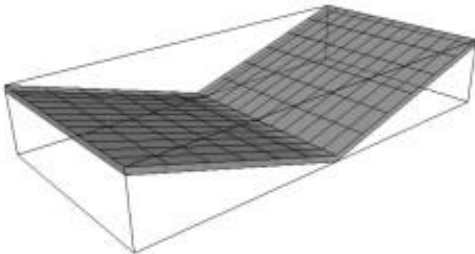
CASE 1: Horizontal aquifer



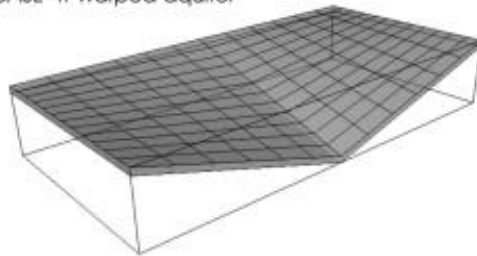
CASE 2: Seawards sloping aquifer



CASE 3: V-shaped aquifer



CASE 4: Warped aquifer



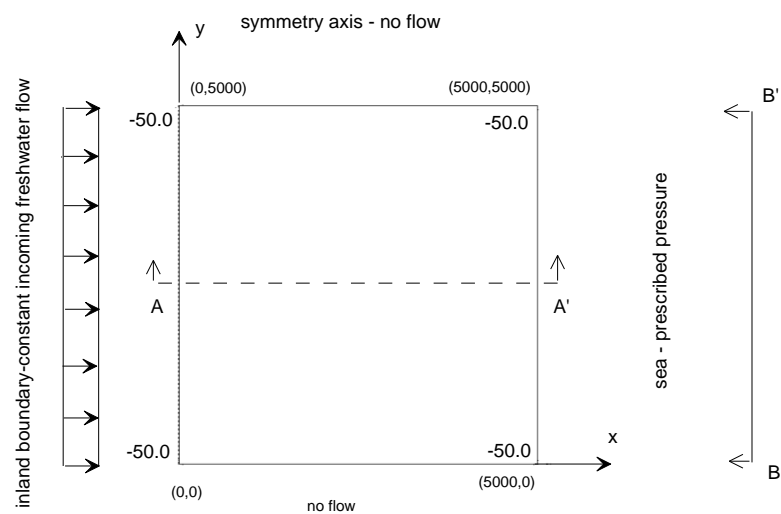
**Εικόνα 5.1.1 : Οι τέσσερις υποκατηγορίες υδροφορέων ως προς την κλίση , σε προοπτική απεικόνιση. Η ροή γλυκού νερού γίνεται από πίσω (ενδοχώρα) προς τα εμπρός ( σύνορο –θάλασσα). Στις περιπτώσεις (3) και (4) διακρίνεται και ο άξονας συμμετρίας (Πηγή: Abarca, E. et al, 2007) <sup>[6]</sup>**

Για την περιγραφή των υδροφορέων που μελετώνται παρατίθενται: i) μία κάτοψη με ισογραμμές του υψομέτρου του πυθμένα. ii) η τομή AA' στο μέσο του σύνορου-θάλασσα και κάθετη σε αυτό, iii) η όψη BB' του υδροφορέα από τη θάλασσα . Στην τομή και την όψη διακρίνονται οι στρώσεις στις οποίες χωρίζονται οι υδροφορείς ,ο ορισμός και η περιγραφή των οποίων γίνεται αναλυτικά παρακάτω.

## 5.1.A)Υδροφορείς σταθερού πάχους

### 5.1.A.1) Οριζόντιος (horizontal)

#### i) Κάτοψη πυθμένα



z-coordinate isolines of the bottom of the confined aquifer

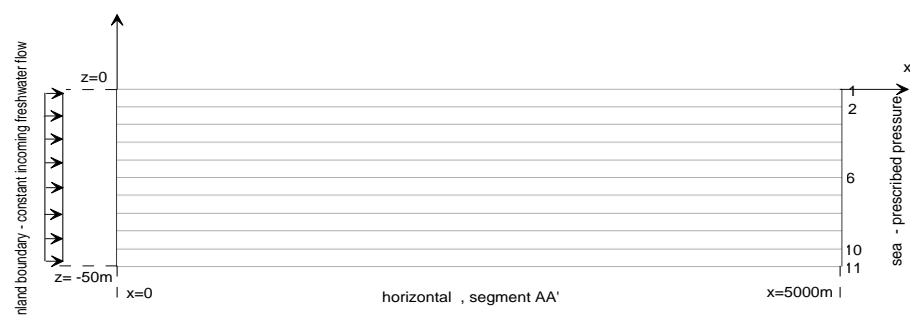
(x,y) coordinates inside the parenthesis

$z=0$  ----> sea surface

#### ii) Τομή AA'

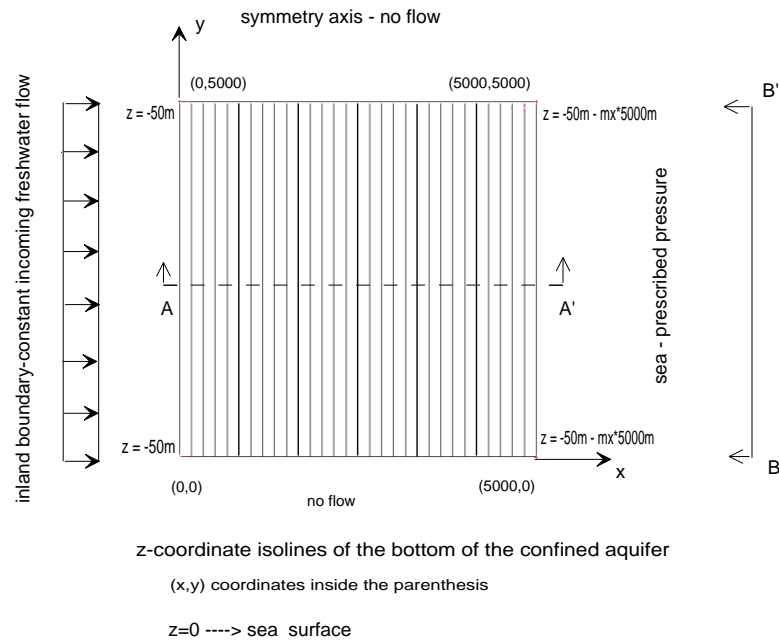


#### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'

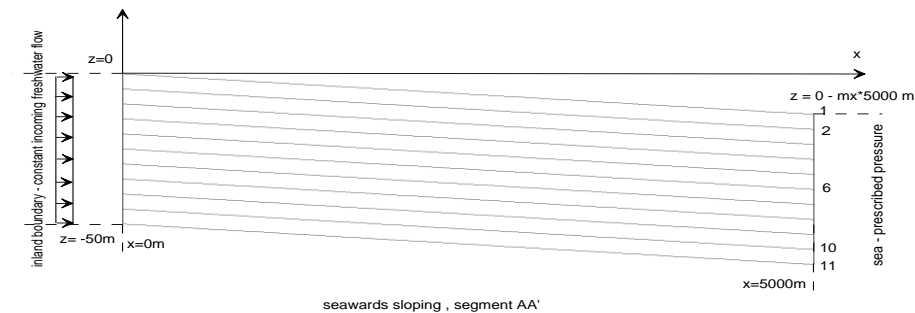


### 5.1.A.2) Υδροφορέας με κλίση $mx$ κάθετη προς το σύνορο –θάλασσα (seawards sloping)

#### i) Κάτοψη πυθμένα



#### ii) Τομή $AA'$

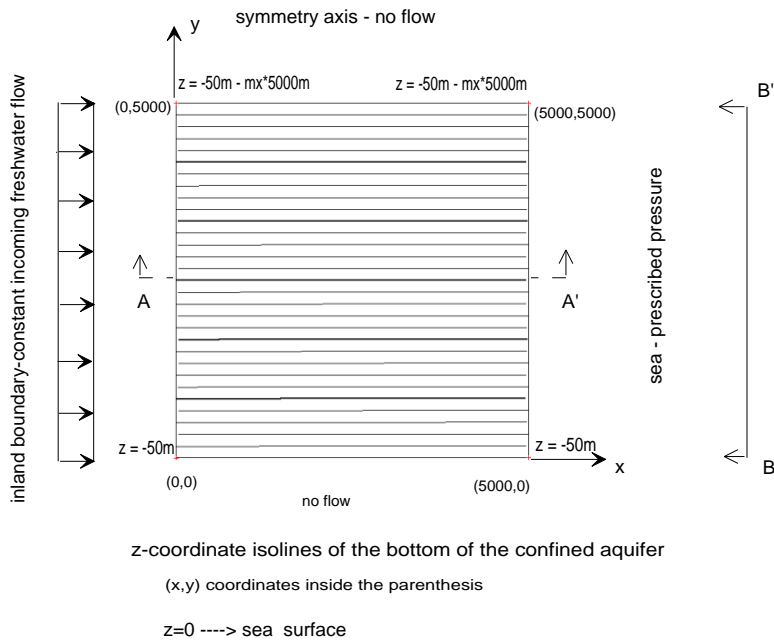


#### iii) Όψη από τη θάλασσα $BB'$

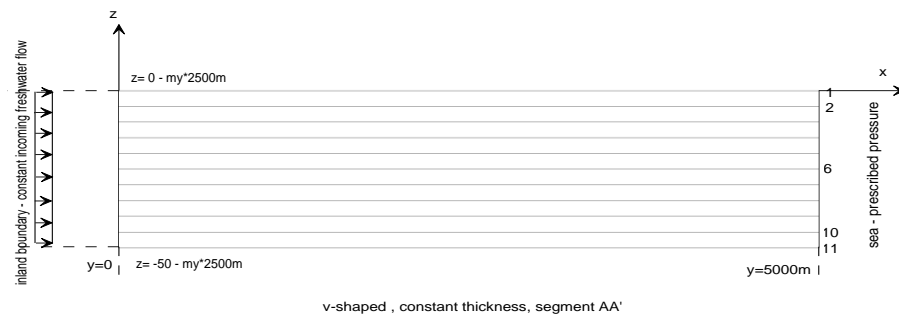


### 5.1.A.3) Υδροφορέας με κλίση $my$ παράλληλη προς το σύνορο – θάλασσα ( $v$ -shaped)

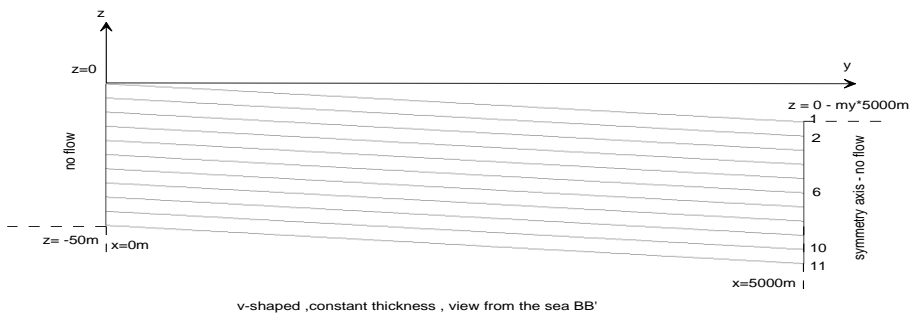
#### i) Κάτοψη πυθμένα



#### ii) Τομή AA'

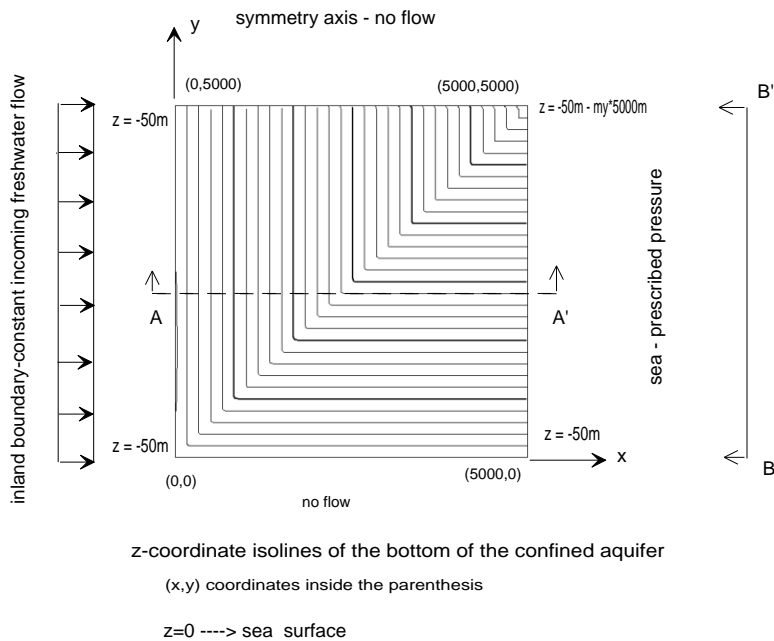


#### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'

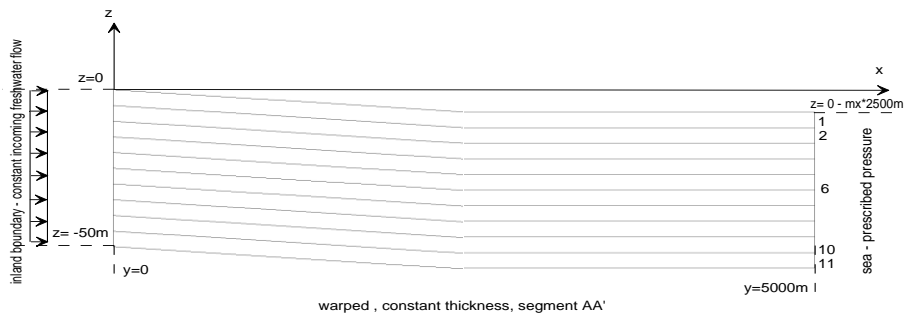


#### 5.1.A.4) Υδροφορέας με κλίση της κάθετης προς το σύνορο – θάλασσα και τη παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (warped)

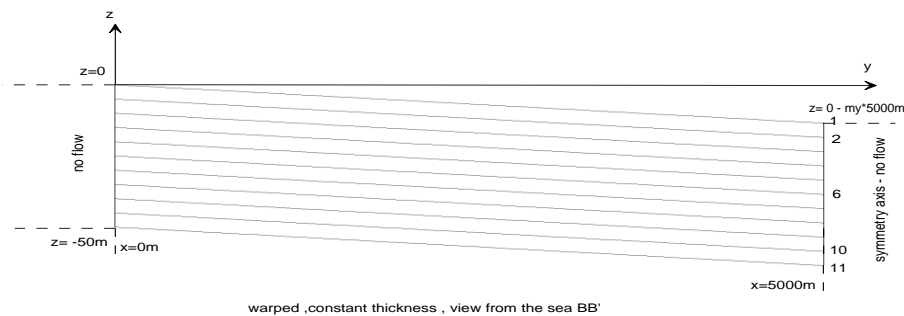
##### i) Κάτοψη πυθμένα



##### ii) Τομή AA'



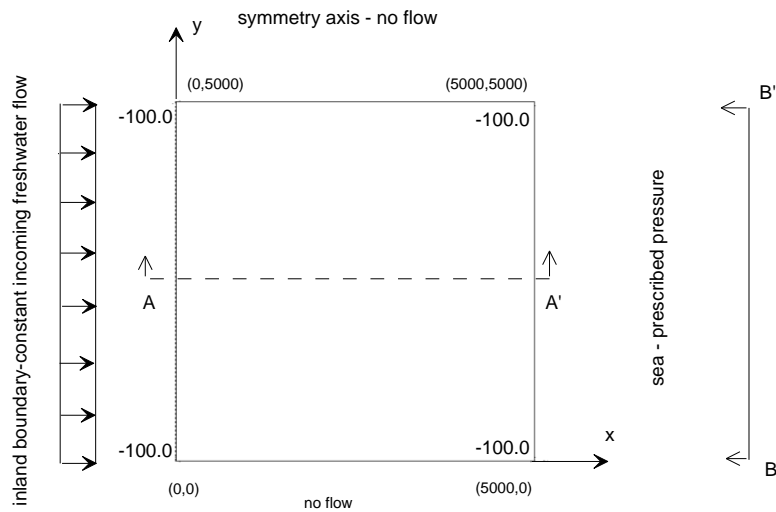
##### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'



## 5.1.B) Υδροφορείς μεταβαλλόμενου ύψους (πάχους)

### 5.1.B.1) Οριζόντιος (horizontal)

#### i) Κάτοψη πυθμένα

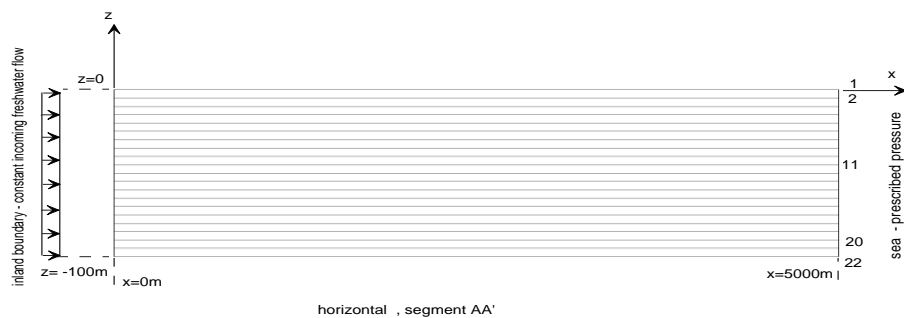


z-coordinate isolines of the bottom of the confined aquifer

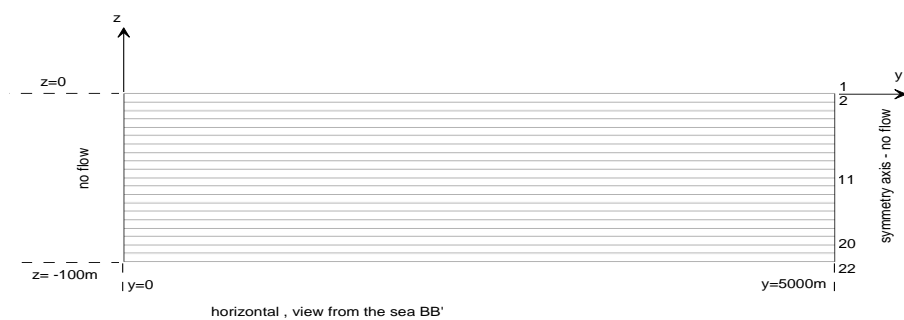
(x,y) coordinates inside the parenthesis

z=0 ----> sea surface

#### ii) Τομή AA'

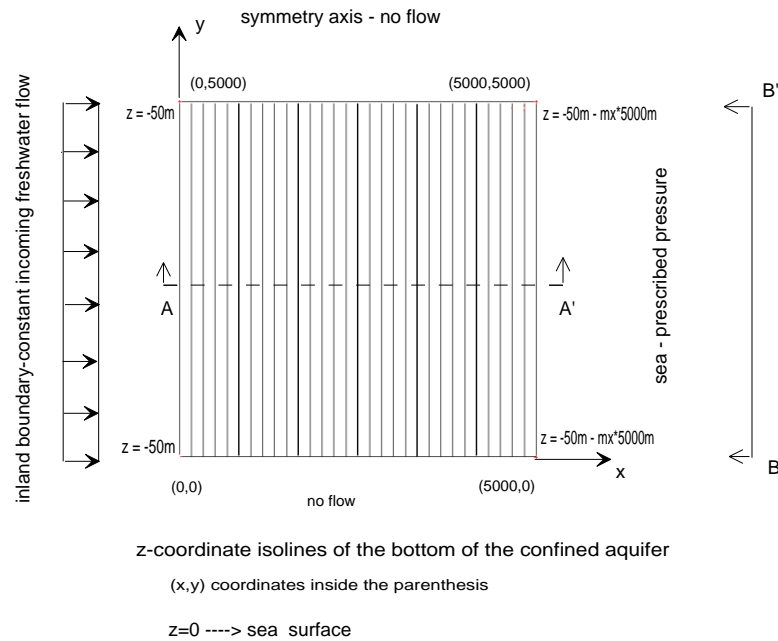


#### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'

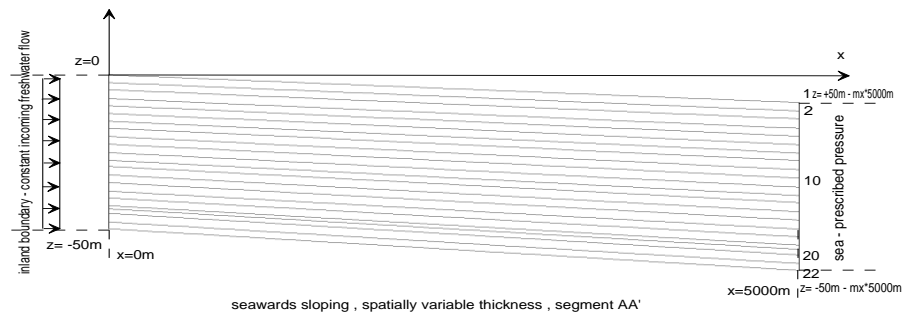


### 5.1.B.2) Υδροφορέας με κλίση $mx$ κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα (seawards sloping)

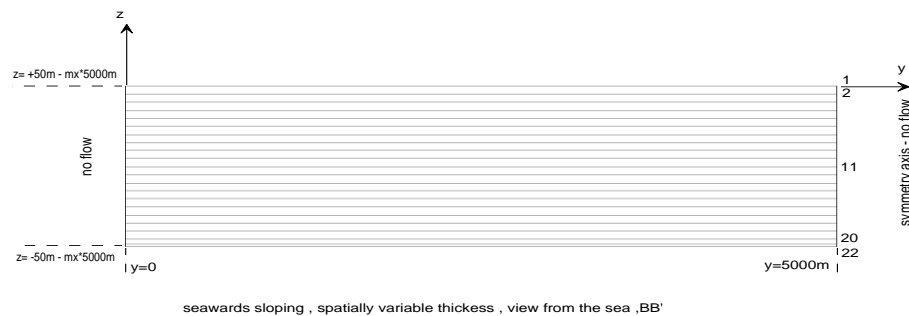
#### i) Κάτοψη πυθμένα



#### ii) Τομή AA'



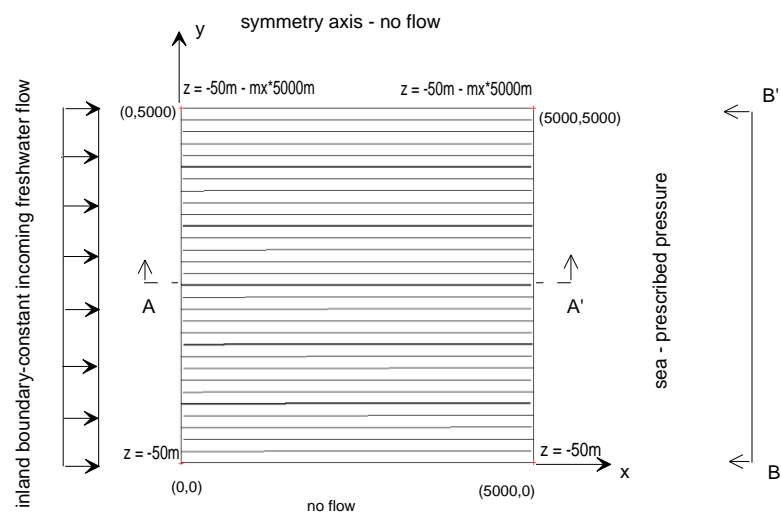
#### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'





### 5.1.B.3) Υδροφορέας με κλίση $my$ παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα ( $v$ - shaped)

#### i) Κάτοψη πυθμένα

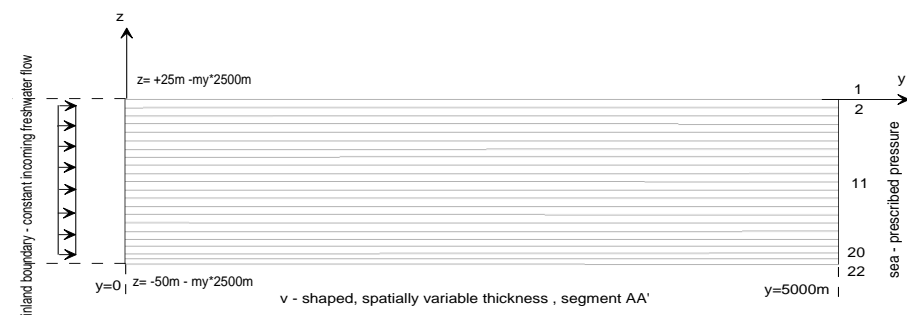


$z$ -coordinate isolines of the bottom of the confined aquifer

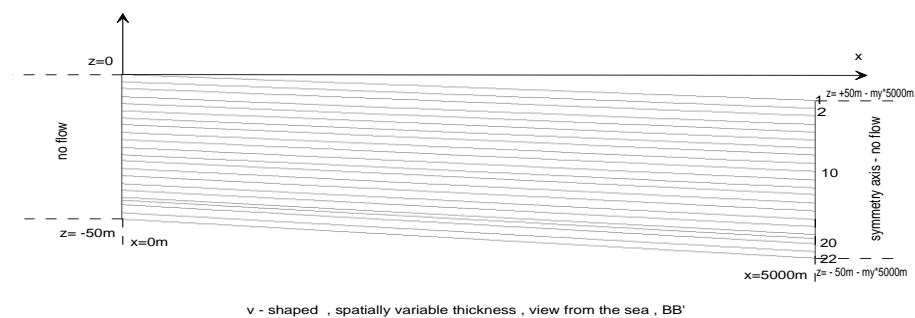
$(x,y)$  coordinates inside the parenthesis

$z=0$  ----> sea surface

#### ii) Τομή AA'

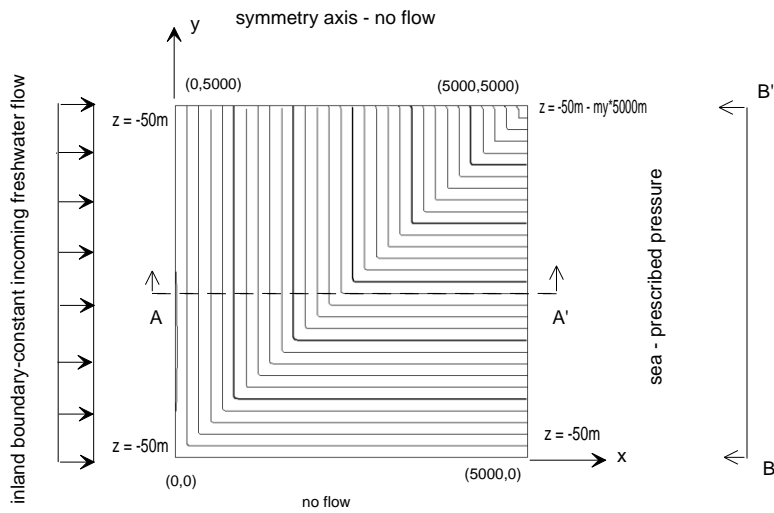


#### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'



#### 5.1.B.4) Υδροφορέας με κλίση της κάθετης προς το σύνορο – θάλασσα και τη παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (warped)

##### i) Κάτοψη πυθμένα

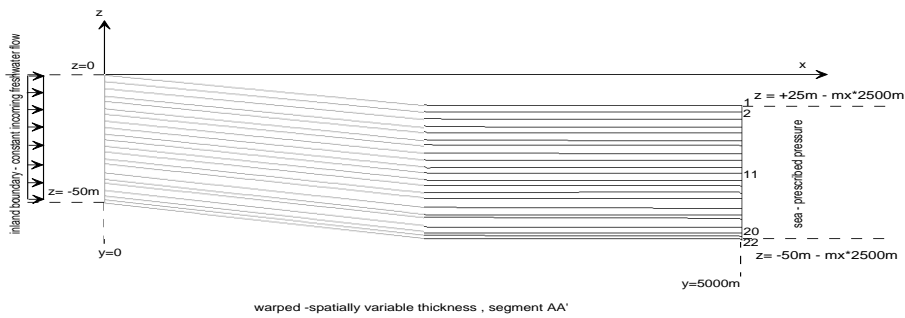


z-coordinate isolines of the bottom of the confined aquifer

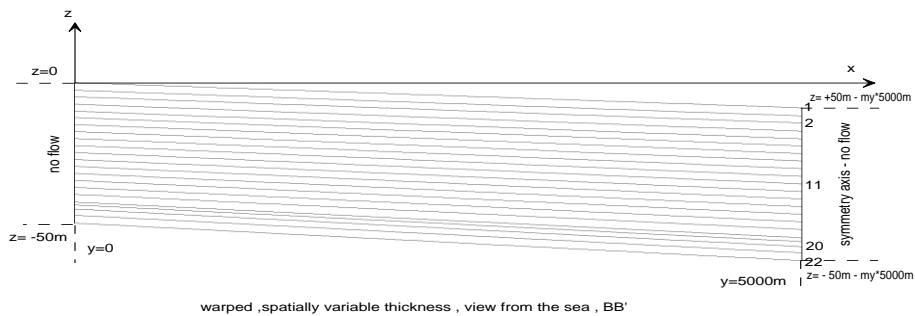
(x,y) coordinates inside the parenthesis

z=0 ----> sea surface

##### ii) Τομή AA'



##### iii) Όψη από τη θάλασσα BB'



## **6. Μαθηματική προσομοίωση του προβλήματος στο λογισμικό FEFLOW**

Ο περιορισμένος υδροφορέας προσομοιώνεται με ένα παραλληλεπίπεδο πρίσμα στο χώρο. Χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα που αποτελούν τα πεπερασμένα στοιχεία .

Για την εισαγωγή του προσομοιώματος στον υπολογιστή χρειάζονται ένα σύνολο σημείων που θα ορίζουν τα όρια του ομοιώματος και επιπλέον τα πεπερασμένα στοιχεία από τα οποία αποτελείται .

Στα διδιάστατα προβλήματα ορίζονται τα όρια του υδροφορέα , είτε με γραφική μέθοδο είτε πληκτρολογώντας τις αντίστοιχες συντεταγμένες , και έπειτα επιλέγεται το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων . Έτσι δημιουργείται στο επίπεδο ένα σύνολο σημείων και γραμμών (ακμών) που αποτελούν τον κάναβο.

Στα τριδιάστατα προβλήματα ορίζονται σε κάτοψη οι διαστάσεις του υδροφορέα και έπειτα ορίζονται σε κάτοψη οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι δημιουργείται στο οριζόντιο επίπεδο ένα σύνολο σημείων και γραμμών (ακμών) που αποτελούν τον κάναβο. Το σύνολο αυτό αυτό που έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα ως μία ενιαία ομάδα ονομάζεται, στο λογισμικό feflow, slice. Για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου απαιτούνται περισσότερα από ένα slices. Σε κάτοψη οι θέσεις και οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων σε όλα τα slices πρέπει να είναι ίδιες . Τα διαφορετικά slices διακρίνονται μεταξύ τους από την τιμή της συντεταγμένης  $z$  για ίδιες συντεταγμένες στο οριζόντιο επίπεδο  $(x,y)$  .

Για έναν τρισδιάστατο υδροφορέα που αποτελείται από δύο slices μπορεί να εισαχθούν τιμές για ένα πλήθος γεωλογικών και υδραυλικών μεταβλητών και παραμέτρων . Τίθενται ,δηλαδή,τουλάχιστον τόσα slices όσα απαιτεί η γεωλογική στρωματογραφία του υδροφορέα . Επιπλέον ,με τα slices ,ο τρισδιάστατος υδροφορέας χωρίζεται σε πολλά μικρότερα πρίσματα ή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία . Το πλήθος και η απόσταση των slices καθορίζει την κατακόρυφη διάσταση των στοιχείων αυτών.Για το λόγο αυτό σε μια περιοχή του μοντέλου με ενιαίες τιμές γεωλογικών και υδραυλικών μεταβλητών και παραμέτρων συχνά συναντώνται περισσότερα από τα δύο slices που την οριοθετούν.

Ο χώρος μεταξύ δύο slices αποκαλείται, στο feflow, layer (στρώση).

### **6.1.Διαστάσεις του κάναβου**

Η επιλογή των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων έγινε με δοκιμές. Ξεκινώντας από (αυθαίρετα επιλεγμένες) μεγαλύτερες τιμές διαστάσεων δημιουργήθηκαν τα μοντέλα με ολοένα και μικρότερες διαστάσεις , έγιναν οι επιλύσεις και επιλέχθηκε το μοντέλο όπου παρατηρήθηκε σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων .Το κάτω όριο των διαστάσεων που μπορούν να δοκιμαστούν τίθεται απο την υπολογιστική δυνατότητα του υπολογιστή.

Οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων συνιστάται να είναι μικρότερες στις περιοχές του μοντέλου όπου έχουμε μεγαλύτερες κλίσεις (μεταβολές) των διάφορων μεγεθών . Για τις περιπτώσεις (1) horizontal και (2) seawards sloping η «κρίσιμη» περιοχή είναι από το σύνορο-θάλασσα έως μία γραμμή παράλληλη στο σύνορο-θάλασσα στο εσωτερικό του υδροφορέα . Επιλέχθηκε αυτή η απόσταση να είναι δυο χιλιόμετρα . Για τις περιπτώσεις (3) v-shaped , (4) warped η κρίσιμη περιοχή είναι επιπλέον από το σύνορο-άξονας συμμετρίας έως μία γραμμή παράλληλη στο σύνορο-άξονα συμμετρίας στο εσωτερικό του υδροφορέα . Επιλέχθηκε αυτή η απόσταση να είναι δύο χιλιόμετρα .

Έτσι η κάτοψη χωρίστηκε σε τέσσερα μέρη : Ένα τετράγωνο μακριά από τις «κρίσιμες περιοχές» (με τετραγωνικό κάνναβο πχ 50m x 50m) , ένα τετράγωνο κοντά στο σύνορο θάλασσα και το σύνορο άξονα συμμετρίας (με πυκνότερο τετραγωνικό κάνναβο 25m x 25m) και δύο ορθογώνια με τον αντίστοιχο ορθογωνικό κάνναβο που δημιουργείται (50m x 25m και 25m x 50m) .

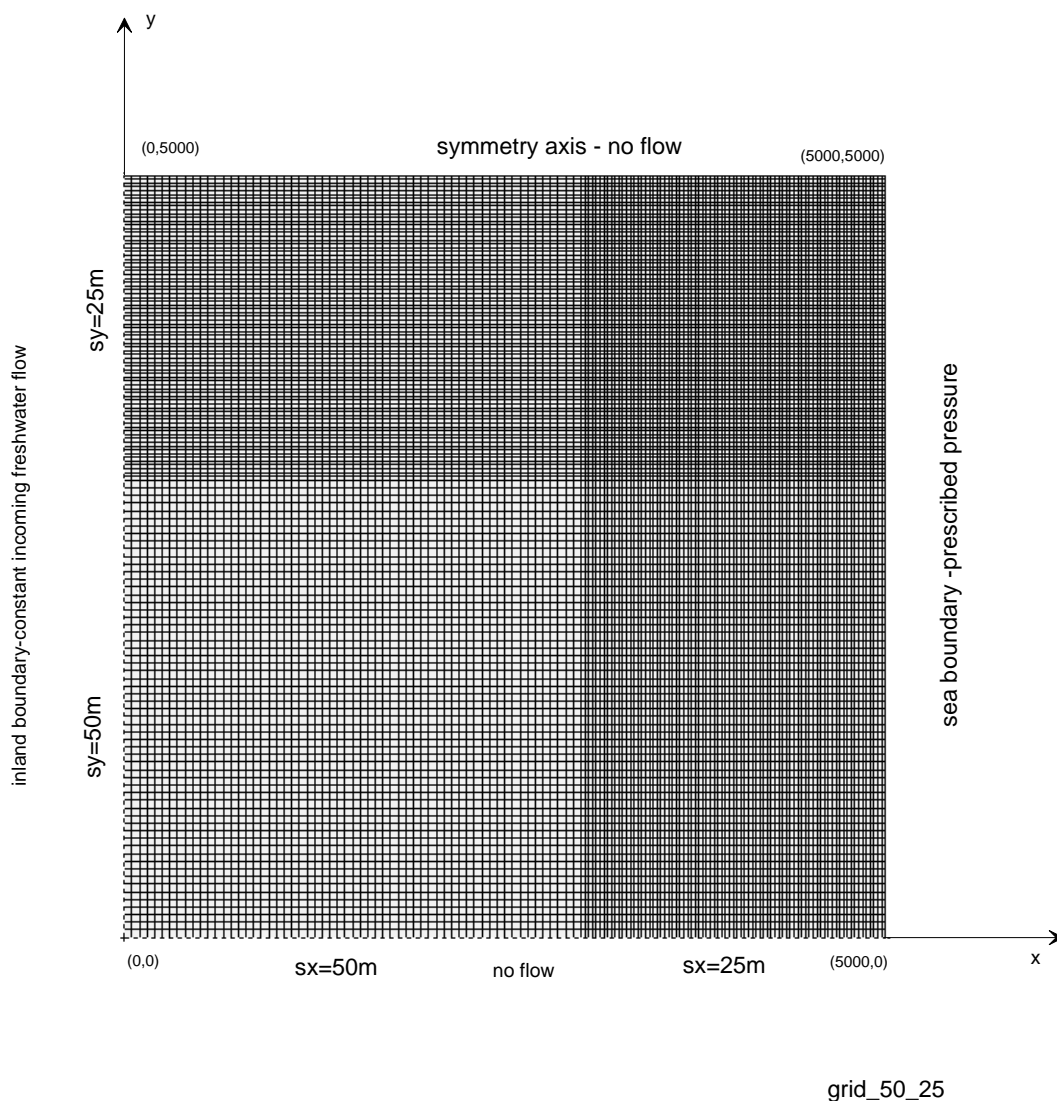


Figure 6.1.1: Κάνναβος

## 6.2.Διάσταση στρώσεων

Αντίστοιχα, η επιλογή των διαστάσεων έγινε με δοκιμές .Στους υδροφορείς σταθερού πάχους παρατηρήθηκε σταθεροποίηση στις δέκα στρώσεις . Στους υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους παρατηρήθηκε σταθεροποίηση στις είκοσι στρώσεις .Επιπλέον προστέθηκε σε απόσταση πέντε μέτρα από τον πυθμένα μία διαχωριστική επιφάνεια (slice) που όλα τα σημεία της έχουν ακριβώς ίδια υψόμετρα με την αντίστοιχη διαχωριστική επιφάνεια του υδροφορέα σταθερού πάχους , ώστε επί της επιφάνειας αυτής είναι δυνατή η σύγκριση μεγεθών μεταξύ υδροφορέων σταθερού και μεταβαλλόμενου πάχους . Διερευνήθηκε στη συνέχεια η επίδραση του αριθμητικού σχήματος .

## 6.3.Αριθμητικό σχήμα

Στο feflow δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ του no upwinding method (galerkin-fem), του streamline upwinding , και του full upwinding. Η χρήση σχήματος upwinding έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή των ασταθειών (instabilities) από τα γραφήματα των μεγεθών που μελετώνται. Ωστόσο, δημιουργείται μία «εικονική» αύξηση του συντελεστή διασποράς ώστε είναι δυνατόν να επηρεαστούν σημαντικά τα αποτελέσματα .\_Στη παρούσα εργασία, μετά από μικρή διερεύνηση επελέγη η χρήση του σχήματος full upwinding για όλες τις περιπτώσεις. Το θέμα χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Εξάλλου, οι συγκρίσεις γίνονται μεταξύ περιπτώσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο αριθμητικό σχήμα (full upwinding).

Οι δοκιμές με διαφορετικούς κানাβους , στρώσεις ,αριθμητικά σχήματα πραγματοποιήθηκαν για τον οριζόντιο υδροφορέα πάχους πενήντα μέτρων. Ο κানাβος, το πλήθος των στρώσεων και το αριθμητικό σχήμα που επελέγησαν χρησιμοποιήθηκαν και στους υπόλοιπους υδροφορείς.

Μετά την σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων και την οριστικοποίηση καναβου , στρώσεων και αριθμητικού σχήματος ,για κάθε μία από τις κατηγορίες υδροφορέων έχουν διαμορφωθεί τα «βασικά μοντέλα» . Στα μοντέλα αυτά είτε αλλάζουν οι τιμές κάποιων παραμέτρων για να διερευνηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων , είτε συγκρίνονται τα αποτελέσματα των βασικών μοντέλων μεταξύ τους .

## 6.4.Μεγέθη που υπολογίζονται

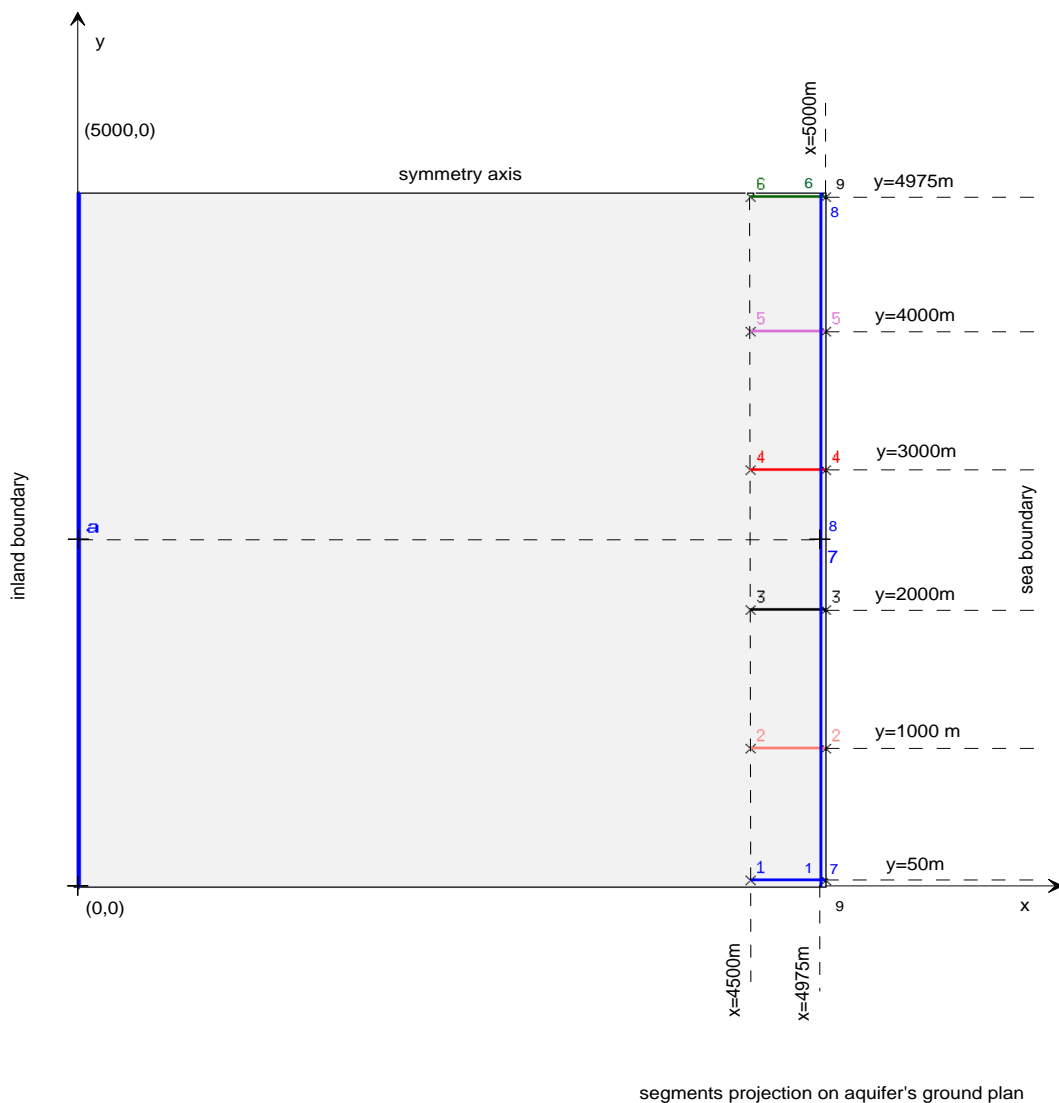
Τα μεγέθη τα οποία θα συγκριθούν είναι η συγκέντρωση άλατος  $C(\text{mg/lit})$  , υδραυλικό φορτίο (δυναμικό)  $h(\text{m})$ , η πίεση  $p(\text{kPa})$  , η ειδική παροχή  $v_D(\text{m/day}, \text{m/sec})$  .

Τα αντίστοιχα εύρη τιμών που προέκυψαν στα «βασικά προβλήματα» (βλ.παρακάτω)είναι για την συγκέντρωση άλατος 0-22000 mg/lit , για το υδραυλικό φορτίο 0-25 m , για την πίεση 0-6000 kPa , για την ειδική παροχή 0 -0.25 m/day.

## 6.5. Τρόποι παρουσίασης των αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει : i)με τόμη στο κατακόρυφο επίπεδο είτε επί του άξονα  $x$  , είτε επί του άξονα  $y$  και παρουσίαση των τιμών των αποτελεσμάτων με ισογραμμές-χρώματα (segments),ii)με εμφάνιση μίας εσωτερικής επιφάνειας του υδροφορέα ,όχι απαραίτητα οριζόντιας εκτεινόμενης όμως σε ολόκληρη την κάτοψή του(slice) και απεικόνιση του μεγέθους με ισογραμμές ή χρώματα,iii)με γράφημα ενός μεγέθους επί μίας γραμμής, συνήθως κάθετης ή παράλληλης σε κάποιο από τα σύνορα,iv)με λήψη των τιμών ενός μεγέθους σε συγκεκριμένα σημεία (observation points) .Για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υδροφορέων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε συγκεκριμένες επιφάνειες (slices) , τομές (segments) και σημεία παρατήρησης (observation points).

Οι θέσεις των τομών σε κάτοψη φαίνονται στην εικόνα 6.5.1.



**Εικόνα 6.5.1. Προβολή των θέσεων των τομών (segments) σε κάτοψη**

Η παρουσίαση και σύγκριση των αποτελεσμάτων σε κάτοψη γίνεται σε επιφάνεια παράλληλη προς τον πυθμένα που απέχει πέντε μέτρα από αυτόν. Στους υδροφορείς σταθερού πάχους είναι το slice10 , στους υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους είναι το slice20.

Σημεία παρατήρησης (observation points) τοποθετήθηκαν επί της τομής 5.

Υδροφορείς σταθερού πάχους			
Σημείο παρατήρησης	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ	Slice
1	4625	4000	2
2	4800	4000	2
3	4975	4000	2
4	4625	4000	6(μέσον)
5	4800	4000	6(μέσον)
6	4975	4000	6(μέσον)
7	4625	4000	10
8	4800	4000	10
9	4975	4000	10
Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους			
Σημείο παρατήρησης	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ	Slice
1	4625	4000	2
2	4800	4000	2
3	4975	4000	2
4	4625	4000	11(μέσον)
5	4800	4000	11(μέσον)
6	4975	4000	11(μέσον)
7	4625	4000	20
8	4800	4000	20
9	4975	4000	20

Κάθε βασικό μοντέλο παρουσιάζεται με:

- 1)Πίνακα με τιμές βασικών μεγεθών και παραμέτρων
- 2)Τομή στη θέση 5 με τις ισοδυναμικές
- 3)Τομή στη θέση 5 με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 4)Τομή στη θέση 2 με τις ισοδυναμικές
- 5)Τομή στη θέση 2 με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 6)Απεικόνιση του slice10/slice20 (υδροφορείς σταθερού πάχους/υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους) με τις ισοδυναμικές
- 7)Απεικόνιση του slice10/slice20 (υδροφορείς σταθερού πάχους/υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους) με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 8)Πίνακα με τις ποσότητες εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού σε τομές επί του συνόρου-θάλασσα (θέσεις 7,8,9 )
- 9)Τιμές δυναμικού σε ορισμένα από τα σημεία παρατήρησης
- 10)Τιμές συγκέντρωσης σε ορισμένα από τα σημεία παρατήρησης



## 6.6.Αδιάστατοι αριθμοί

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 (εξίσωση 4.1.2.1), η ροή (ειδική παροχή) υπολογίζεται από το γενικευμένο νόμο του Darcy:

$$q_i = -K_{ij} \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} e_j \right)$$

$q_i$  : η ειδική παροχή [ $LT^{-1}$ ]

$K_{ij}$  : η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]

$\rho$  : η πυκνότητα του ρευστού [ $ML^{-3}$ ]

$e_j$  : το μοναδιαίο κατακόρυφο διάνυσμα

Για να αναλυθεί η επίδραση της κλίσης του πυθμένα ένας αδιάστατος αριθμός ( $N_b$ ) ορίζεται ώστε να συγκρίνει τους δύο όρους της παραπάνω εξίσωσης. Ο πρώτος όρος, η ροή λόγω υδραυλικού φορτίου ( $K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i}$ ) μπορεί να προσεγγίζεται από την εισροή στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ). Ο δεύτερος όρος πολλαπλασιάζεται με τη μέγιστη ή τη μέση κλίση ( $m$ ) του πυθμένα, ώστε να συνυπολογιστεί η επίδραση της τοπογραφίας (συγκεκριμένα του υψόμετρου) του υδροφορεά ([6]).

$$N_b = \frac{\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} Km}{q_{in}} \quad (6.6.1)$$

Στην παρούσα εργασία είναι πιο κατάλληλο να θεωρήσουμε έναν αδιάστατο αριθμό «πλευρικής άνωσης» (lateral buoyancy), ώστε να συγκρίνουμε τη ροή προς τη θάλασσα με τη ροή λόγω άνωσης κατά την κάθετη στην αρχική ταχύτητα διεύθυνση (δηλαδή την παράλληλη στην ακτή).

$$N_{by} = \frac{\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} Km_y}{q_{in}} \quad (6.6.2)$$

Αντίστοιχα, μπορεί να οριστεί

$$N_{bx} = \frac{\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} Km_x}{q_{in}} \quad (6.6.3)$$

Υδροφορέας	Nx	Ny
horizontal	0	0
seawards sloping mx=0.01	0.147	0
seawards sloping mx=0.03	0.441	0
Seawards sloping mx=0.07	1.029	0
seawards sloping mx=0.1	1.47	0
v shaped my=0.01	0	0.147
v shaped my=0.03	0	0.441
v shaped my=0.07	0	1.029
v shaped my=0.1	0	1.47
warped mx=0.01 ,my=0.01	0.147	0.147
warped mx=0.03, my=0.03	0.441	0.441
warped mx=0.07 , my=0.07	1.029	1.029
warped mx=0.1 , my=0.1	1.47	1.47

**Πίνακας 6.6.1: Τιμές του αδιάστατου αριθμού N για τους υπό εξέταση υδροφορείς**

## 7. Οριζόντιος υδροφορέας

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στον οριζόντιο υδροφορέα πάχους πενήντα μέτρων

### 7.1. Διαδικασία επιλογής διαστάσεων πεπερασμένων στοιχείων και αριθμητικού σχήματος.

Όπως έχει αναφερθεί για τη δημιουργία του κανάβου επιλέγεται ένα βήμα στον άξονα  $x$  ( $s_x$ ) και ένα βήμα στον άξονα  $y$  ( $s_y$ ), που καθορίζουν τις δύο οριζόντιες διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που προκύπτουν. Η γεωμετρία της κάτοψης επιτρέπει να είναι  $s_x = s_y$ . Ωστόσο, οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων συνιστάται να είναι μικρότερες στις περιοχές του μοντέλου όπου έχουμε μεγαλύτερες κλίσεις (μεταβολές) των διάφορων μεγεθών (κρίσιμες περιοχές). Έτσι, ορίζεται το βήμα  $s_{x_{near}} = s_{y_{near}}$  μέχρι απόσταση δύο χιλιομέτρα από τον άξονα συμμετρίας και το σύνορο -θάλασσα, και βήμα  $s_{x_{away}} = s_{y_{away}}$  στα υπόλοιπα τρία χιλιομέτρα μέχρι την αρχή των αξόνων. Στην παρούσα εργασία ο κανάβος ονομάζεται `grid_saway_snear`.

Το ύψος των στρώσεων καθορίζει την κατακόρυφη διάσταση του χωρικού πεπερασμένου στοιχείου. Έγιναν δοκιμές για τέσσερις, έξι, οκτώ, δέκα και δώδεκα στρώσεις (layers). Οι διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων (slices) ορίστηκαν ισαπέχουσες στα όρια του μοντέλου.

Για οριζόντιο υδροφορέα (horizontal) σταθερού πάχους  $b=50\text{m}$  δημιουργήθηκαν τα μοντέλα που προκύπτουν από όλους τους συνδυασμούς μεταξύ των κανάβων `grid_100_100`, `grid_50_50`, `grid_50_25`, `grid_50_15` και των 4, 6, 8, 10, 12 στρώσεων.

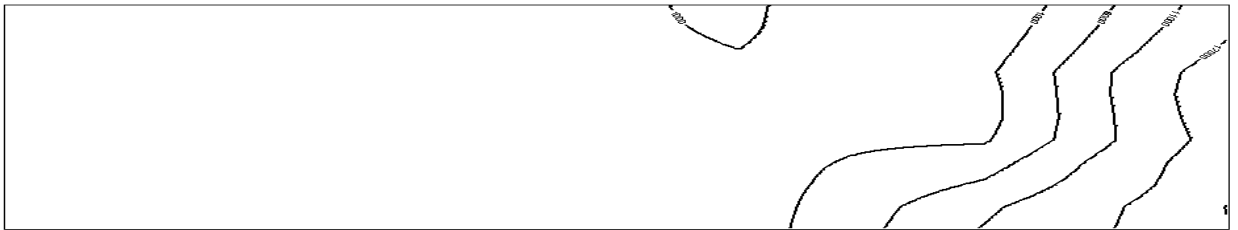
Για τη σύγκριση ελέγχουμε στη θέση πέντε (βλέπε εικόνα 6.5.1) και για απόσταση πεντακόσια μέτρα από το σύνορο-θάλασσα τις ισοδυναμικές και τις ισογραμμές της συγκέντρωσης. Κριτήριο για την επιλογή ενός κανάβου και ενός αριθμού στρώσεων είναι η σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκε σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων `grid_50_25/10layers`, `grid_50_25/12layers`, `grid_50_15/10layers`, `grid_50_15/12layers`. Για περιορισμό του υπολογιστικού φόρτου επιλέχθηκε το μοντέλο `grid_50_25/10layers`.

### 7.1.1. Σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων ως προς τον κানাβο

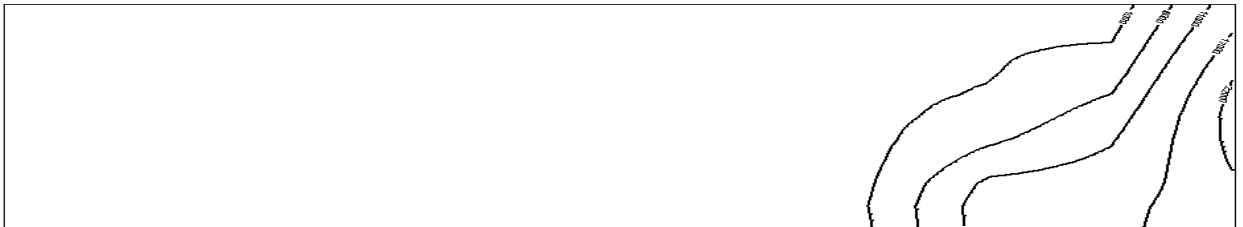
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δέκα στρώσεις και διαφορετικούς καναβους .

#### 7.1.1.1.Ισογραμμές της συγκέντρωσης

i)grid\_100\_100/10layers



ii)grid\_50\_50/10layers



iii)grid\_50\_25/10layers

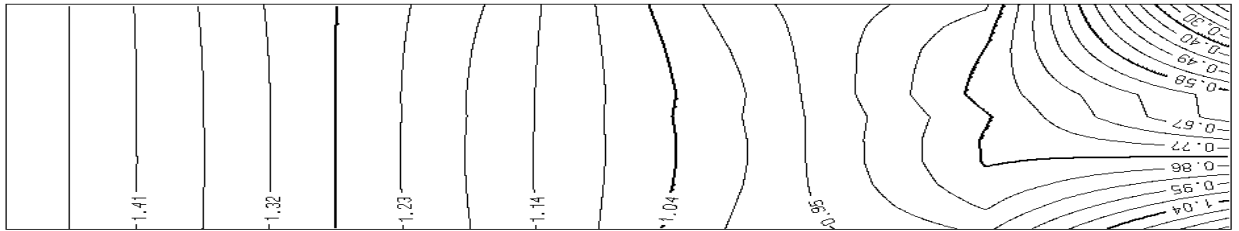


iv)grid\_50\_15



### 7.1.1.2.Ισοδυναμικές

i)grid\_100\_100



ii)grid\_50\_50



iii)grid\_50\_25



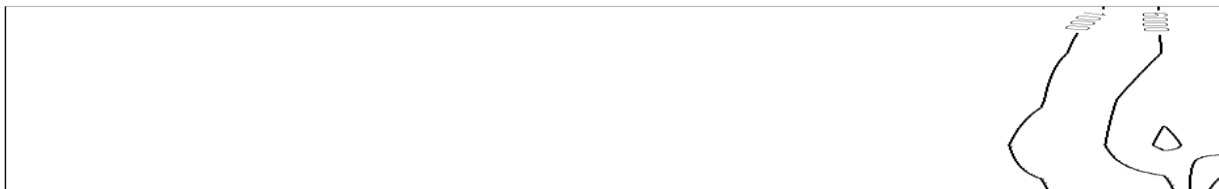
iv)grid\_50\_15



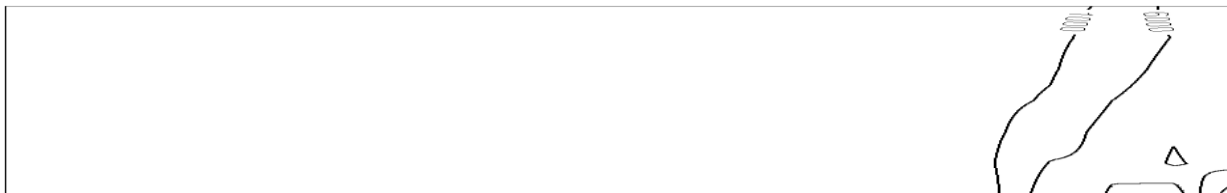
## 7.1.2. Σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων ως προς τις στρώσεις

### 7.1.2.1. Ισογραμμές της συγκέντρωσης

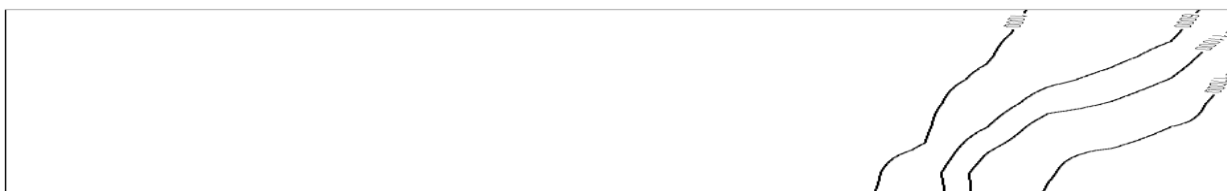
i) grid\_50\_25 , 4 layers



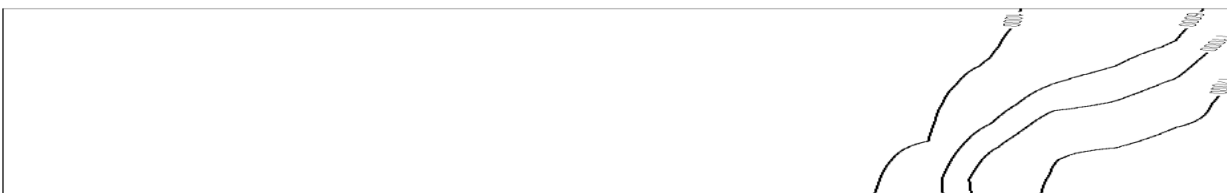
ii) grid\_50\_25 , 6 layers



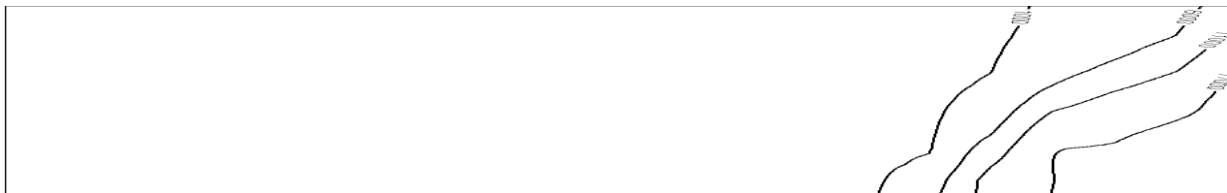
iii) grid\_50\_25 , 8 layers



iv) grid\_50\_25 , 10 layers



v) grid\_50\_25 , 12 layers



#### 7.1.2.2.Ισοδυναμικές

i) grid\_50\_25 , 4 layers



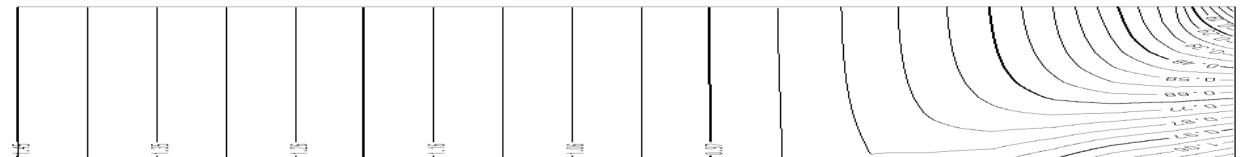
ii) grid\_50\_25 ,6 layers



iii)grid\_50\_25 , 8 layers



iv)grid\_50\_25 , 10 layers

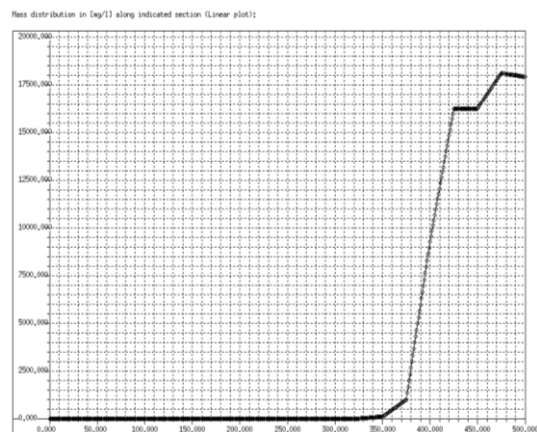


v)grid\_50\_25 , 12 layers

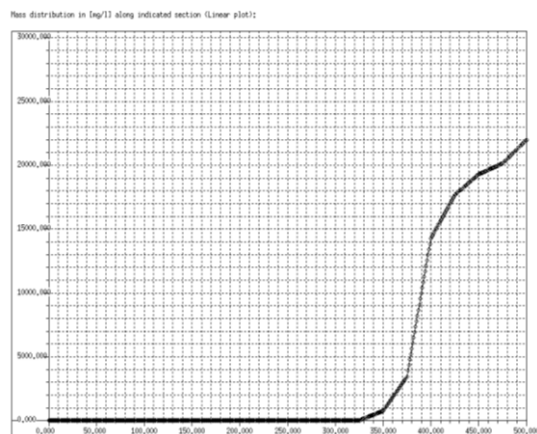


### 7.1.3.Επίδραση του αριθμητικού σχήματος

Στο μοντέλο που επιλέχθηκε grid\_50\_25/10layers πραγματοποιούνται γραφήματα της συγκέντρωσης επί μερικών διαχωριστικών επιφανειών ( slices ). Παρατίθεται το γράφημα στα slice 8 , 11 στη θέση 5.



Εικόνα 7.3.1: grid\_50\_25/10layers,slice8,διάγραμμα συγκέντρωσης στη θέση της τομής 5



Εικόνα 7.3.2: grid\_50\_25/10layers,slice11,διάγραμμα συγκέντρωσης στη θέση της τομής 5

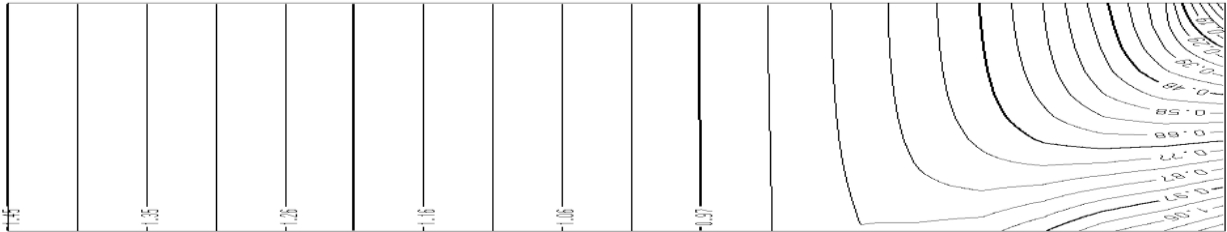
Παρατηρούνται στα γράφηματα «αστάθειες» (instabilities) .

Διερευνάται ο ρόλος του αριθμητικού σχήματος στα αποτελέσματα. Στο feflow δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ του no upwinding method (galerkin-fem) ( με αυτό το σχήμα έχουν τρέξει τα παραπάνω μοντέλα ) , του streamline upwinding , και του full upwinding .

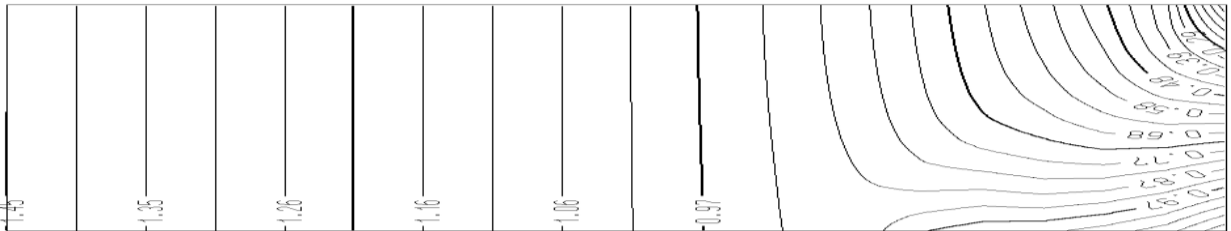


### 7.1.3.1.Ισοδυναμικές

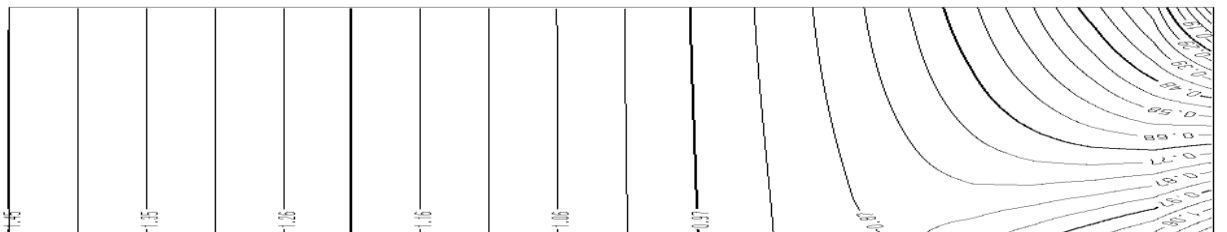
i)grid\_50\_25 , 10 layers , no upwinding



ii)grid\_50\_25, 10 layers , streamline upwinding

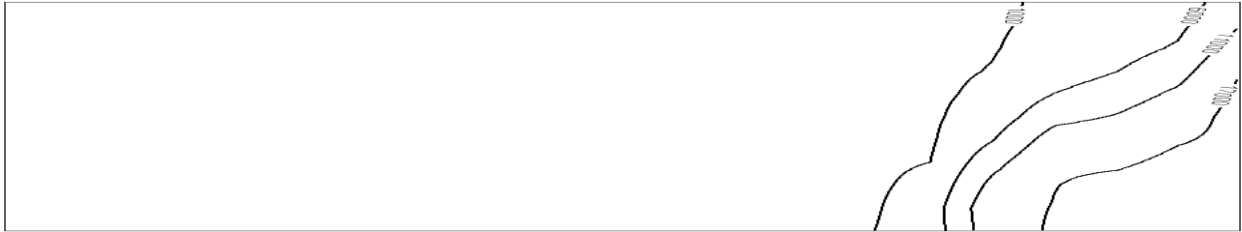


iii)grid\_50\_25 , 10 layers , full upwinding

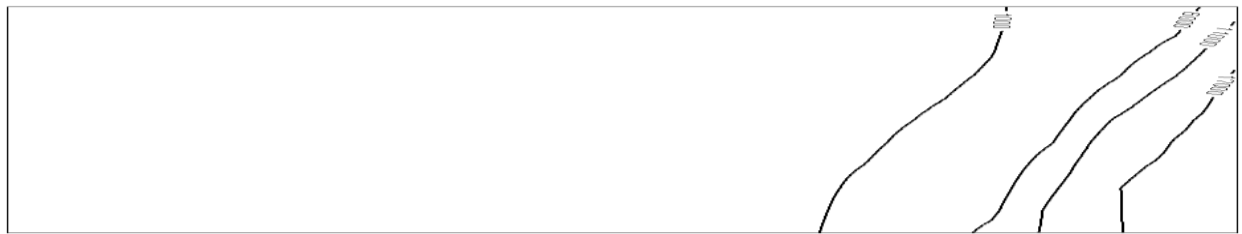


### 7.1.3.2. Ισογραμμές της συγκέντρωσης

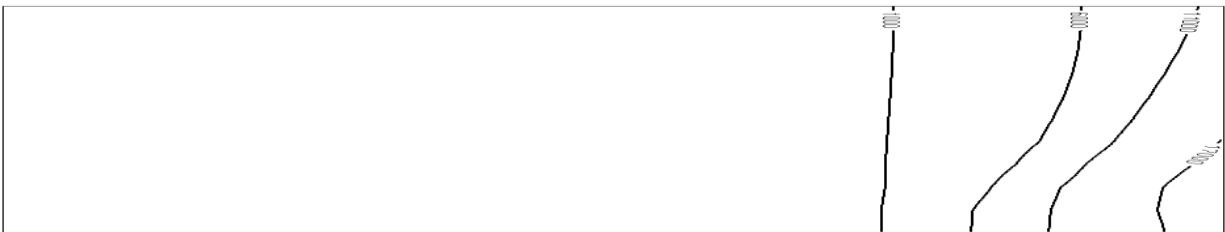
i) grid\_50\_25 , 10 layers , no upwinding



ii) grid\_50\_25 , 10 layers , streamline upwinding

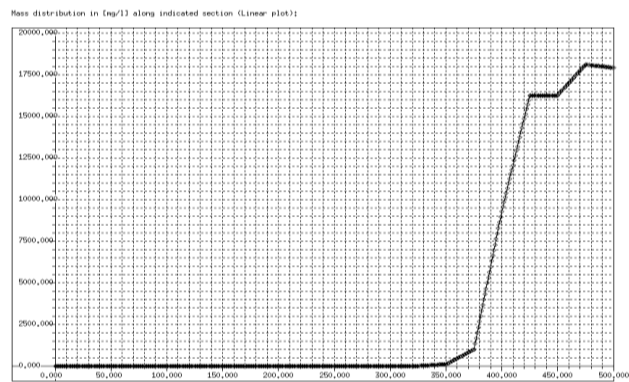


iii) grid\_50\_25 , 10 layers , full upwinding

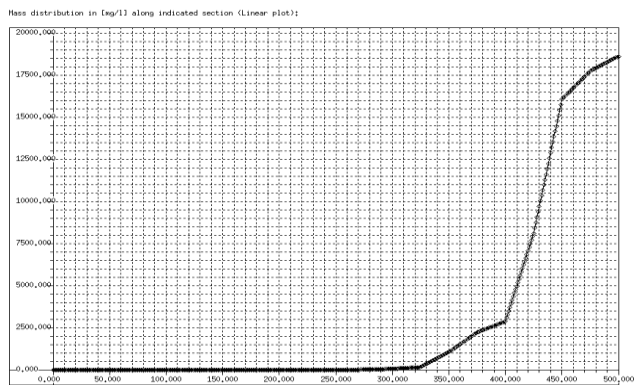


### 7.1.3.3.Γράφημα C στη θέση 5 – slice 8

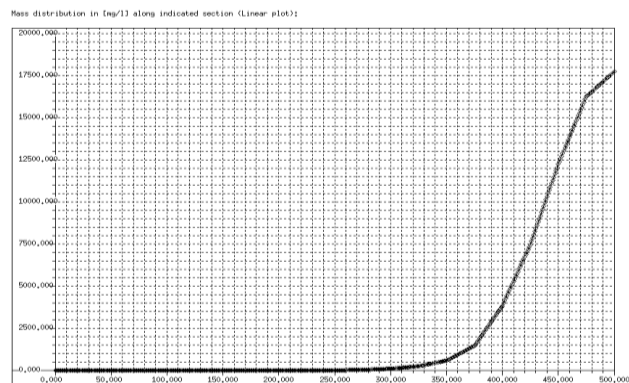
i)grid\_50\_25 ,10 layers , no upwinding



ii)grid\_50\_25 ,10 layers , streamline upwinding

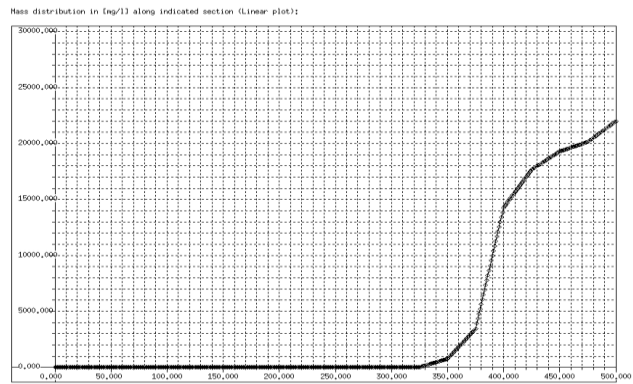


iii)grid\_50\_25 ,10 layers , full upwinding

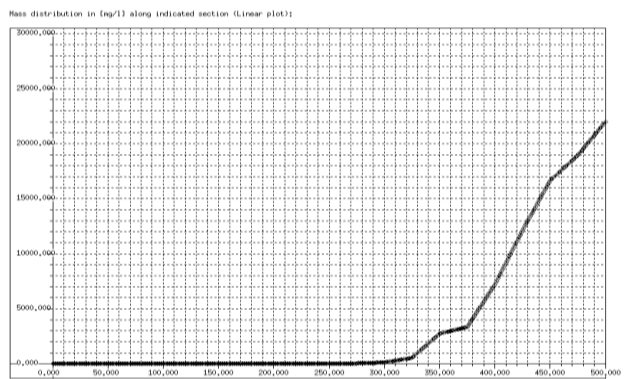


#### 7.1.3.4.Γράφημα C στη θέση 5-slice 11

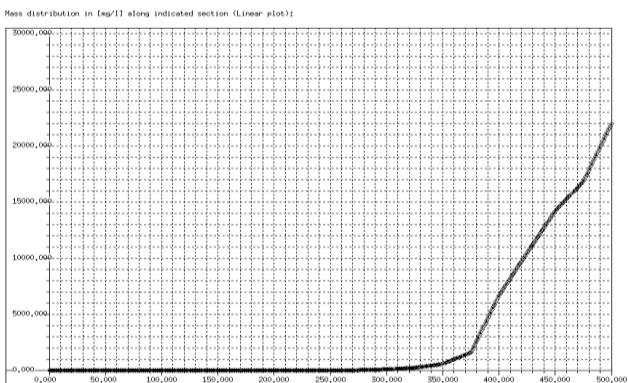
i)grid\_50\_25 ,10 layers , no upwinding



ii)grid\_50\_25 ,10 layers , streamline upwinding



iii)grid\_50\_25 ,10 layers , full upwinding



Γίνεται φανερή η ομαλοποίηση των γραμμών και η απαλοιφή των «ασταθειών» με το σχήμα full upwinding .

Παρατήρηση : Μεταξύ no upwinding και full upwinding η μορφή των ισογραμμών της συγκέντρωσης μεταβάλλεται σημαντικά . Οι αστάθειες απαλείφονται , όμως ισογραμμές με μεγαλύτερη τιμή της συγκέντρωσης  $C$  έρχονται πιο «μέσα» στον υδροφορέα .Με τη μέθοδο upwinding δημιουργείται μία «εικονική» αύξηση του συντελεστή διασποράς ώστε είναι δυνατόν να επηρεαστούν σημαντικά τα αποτελέσματα. Αυτή η αύξηση του συντελεστή διασποράς αποτυπώνεται στο ότι οι ισογραμμές με μεγαλύτερη τιμή της συγκέντρωσης  $C$  έρχονται πιο «μέσα» στον υδροφορέα.

Στη παρούσα εργασία , δεν θα μας απασχολήσει η μεταβολή αυτή γιατί οι συγκρίσεις θα γίνονται μεταξύ περιπτώσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά , στις οποίες θα έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο αριθμητικό σχήμα (full upwinding).

Συνοψίζουμε τα χαρακτηριστικά του προβλήματος για οριζόντιο υδροφορέα σταθερού πάχους . Το μοντέλο αυτό το ονομάζουμε βασικό μοντέλο.

<b>Horizontal-basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες n	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης Ddiff	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς aL	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς aT	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή qin	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό Co	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό Cs	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος lx	5000m
Πλάτος ly	5000 m
Ύψος H	50 m
Κλίση mx	0
Κλίση my	0
Διάσταση κάναβου sxa/sxn μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου sxa/syn μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	Nx=0 , Ny=0

## 7.2.Διερεύνηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε παραμέτρους του προβλήματος

### 7.2.1. Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$

Στον οριζόντιο υδροφόρα πάχους  $b=50\text{m}$  εξετάστηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην παράμετρο συντελεστής διαμήκους διασποράς  $a_L$  (ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς  $a_T$  λαμβάνεται σε κάθε περίπτωση  $a_T=0.1 a_L$ ). Τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι : τομή στη θέση 5 – ισοδυναμικές, τομή στη θέση 5 - ισογραμμές της συγκέντρωσης , πίνακας εισερχόμενου /εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα. Η τομή πραγματοποιείται στη θέση πέντε (βλέπε εικόνα 6.5.1) και για απόσταση πεντακόσια μέτρα από το σύνορο-θαλασσα.

#### 7.2.1.1. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές

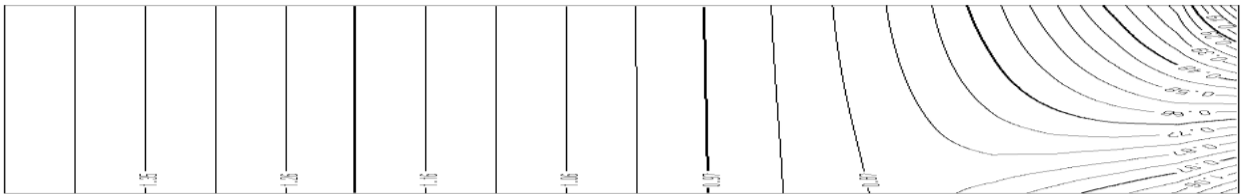
i)  $a_L=5\text{m}$



ii)  $a_L=10\text{m}$



iii)  $a_L=15\text{m}$

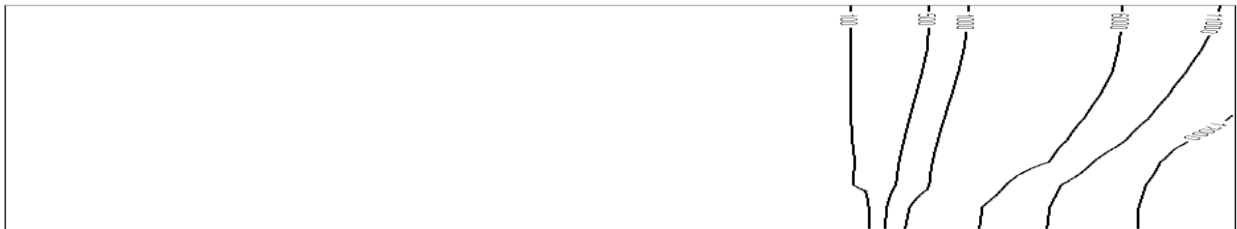


iv)  $a_L=20\text{m}$

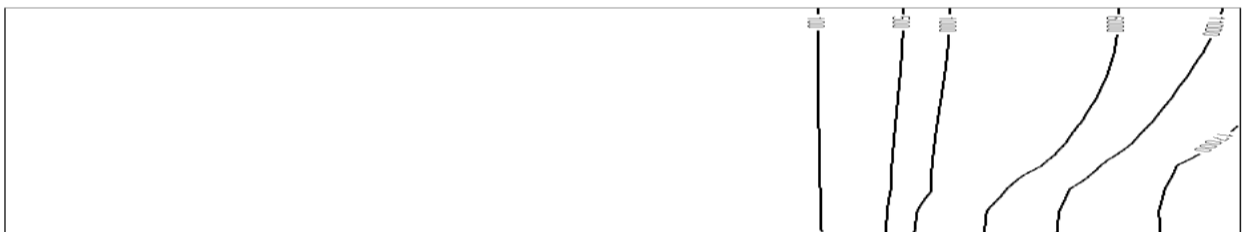


### 7.2.1.2. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης

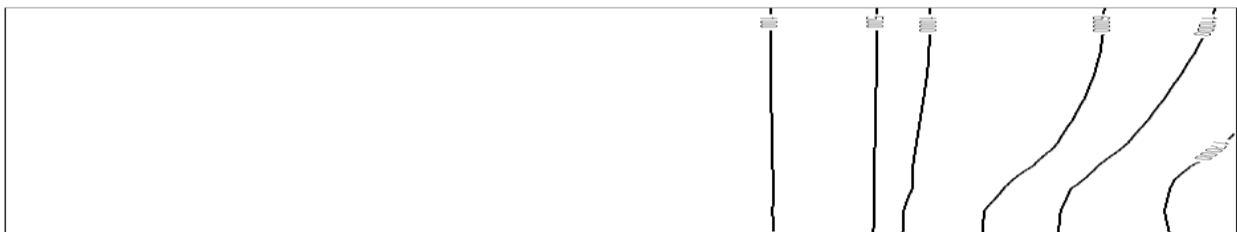
i)  $a_L=5m$



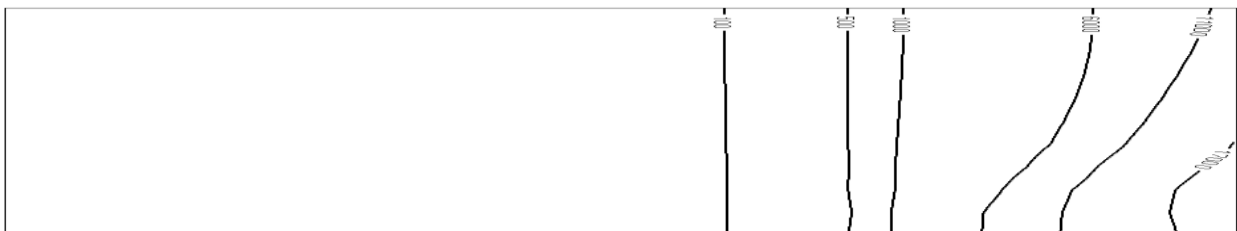
ii)  $a_L=10m$



iii)  $a_L=15m$



iv)  $a_L=20m$



Η επίδραση του συντελεστή διαμήκους διασποράς στις ισοδυναμικές είναι αμελητέα.

Η επίδραση του συντελεστή διαμήκους διασποράς στις ισογραμμές της συγκέντρωσης είναι πολύ μικρή και παρατηρείται κυρίως στις μικρότερες τιμές της συγκέντρωσης. Αύξηση του συντελεστή έχει ως αποτέλεσμα μικρή μετατόπιση των ισογραμμών προς το εσωτερικό του υδροφορέα.



### 7.2.1.3. Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα

i)  $a_L=5m$

	Εισροή από τη θάλασσα( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

ii)  $a_L=10m$

	Εισροή από τη θάλασσα( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

iii)  $a_L=15m$

	Εισροή από τη θάλασσα( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.42	10.92
Στη θέση 7	3.22	5.51
Στη θέση 8	3.22	5.51

iv)  $a_L=20m$

	Εισροή από τη θάλασσα( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.42	10.92
Στη θέση 7	3.22	5.51
Στη θέση 8	3.22	5.51

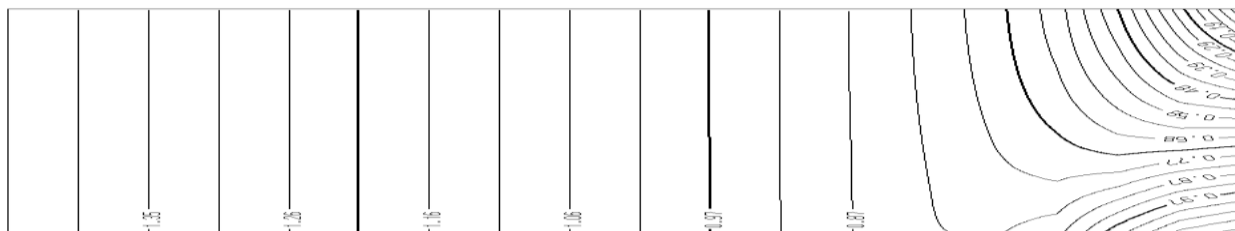
Η επίδραση του συντελεστή διαμήκους διασποράς στις εισροές και τις εκροές στο σύνορο-θάλασσα είναι αμελητέα.

## 7.2.2. Συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς

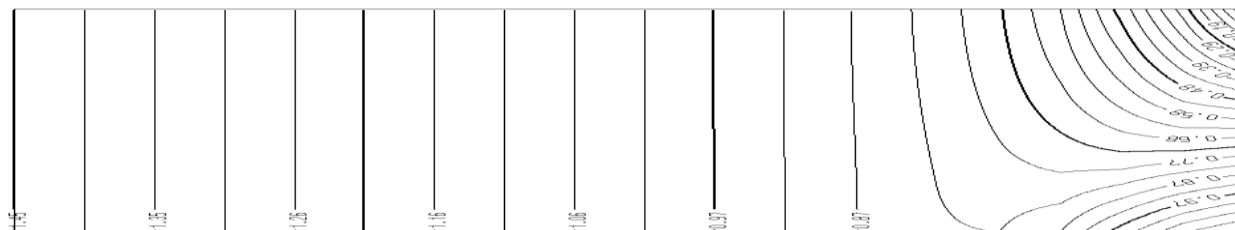
Στον οριζόντιο υδροφορέα πάχους  $b=50\text{m}$  εξετάστηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην παράμετρο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς ( $D_{hd}$ ). Τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι : τομή στη θέση 5 – ισοδυναμικές, τομή στη θέση 5 - ισογραμμές της συγκέντρωσης , πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα. Η τομή πραγματοποιείται στη θέση πέντε (βλέπε εικόνα 6.5.1) και για απόσταση πεντακόσια μέτρα από το σύνορο-θαλασσα.

### 7.2.2.1. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές

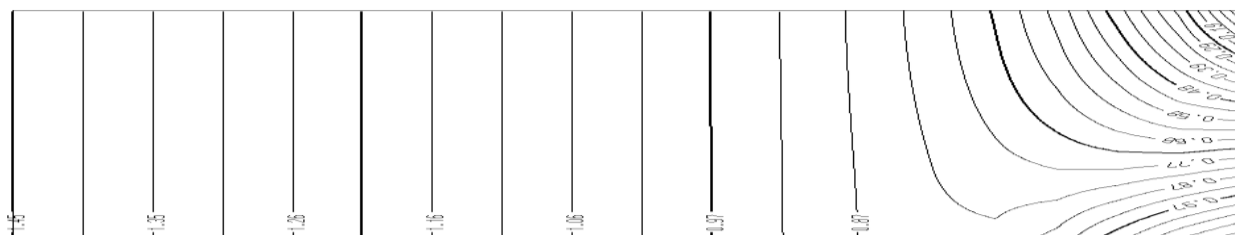
i)  $D_{hd}=1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



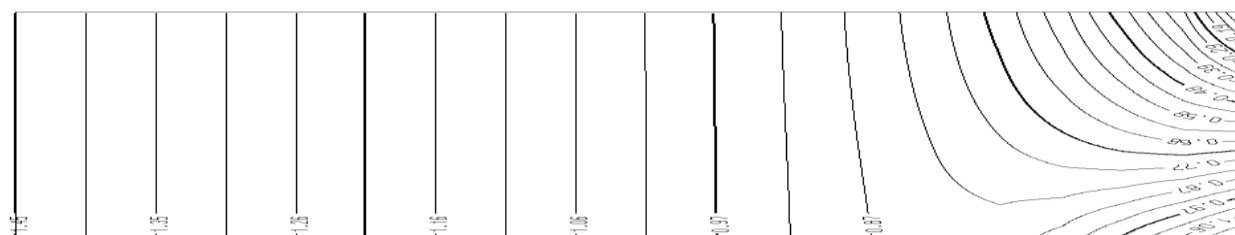
ii)  $D_{hd}=5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



iii)  $D_{hd}=9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

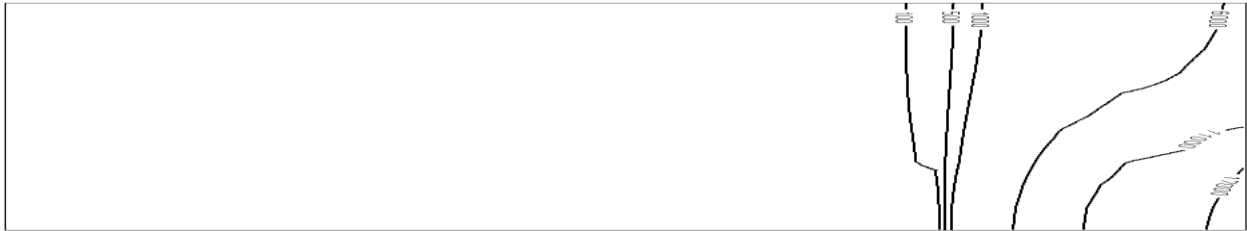


iv)  $D_{hd}=15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

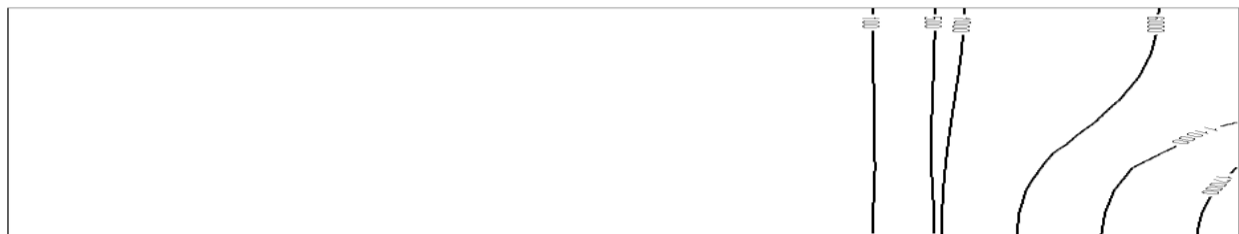


### 7.2.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης

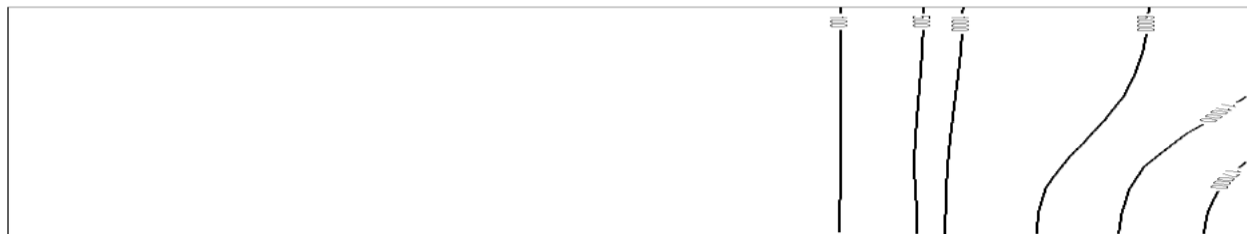
i)  $D_{hd} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



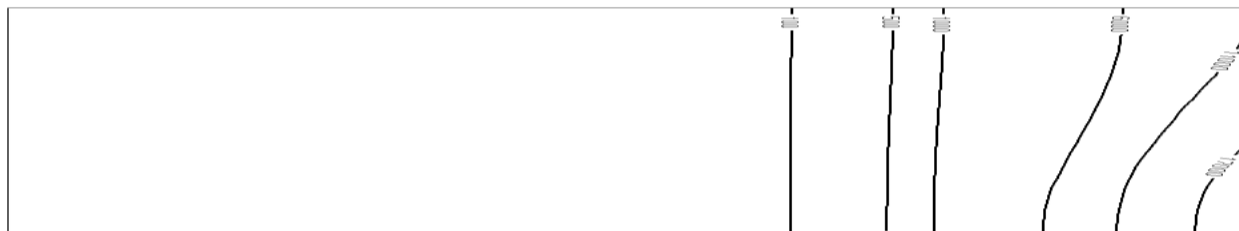
ii)  $D_{hd} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



iii)  $D_{hd} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



iv)  $D_{hd} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$



Η επίδραση του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς στις ισοδυναμικές είναι αμελητέα.

Η επίδραση του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς στις ισογραμμές της συγκέντρωσης είναι πολύ μικρή και παρατηρείται κυρίως στις μικρότερες τιμές της συγκέντρωσης. Αύξηση του συντελεστή έχει ως αποτέλεσμα μικρή μετατόπιση των ισογραμμών προς το εσωτερικό του υδροφορέα.

### 7.2.2.3. Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα

i)  $D_{hd} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	10.9	15.4
Στη θέση 7	5.5	7.8
Στη θέση 8	5.5	7.8

ii)  $D_{hd} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	9.4	13.9
Στη θέση 7	4.7	7
Στη θέση 8	4.7	7

iii)  $D_{hd} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	8.4	12.9
Στη θέση 7	4.2	6.5
Στη θέση 8	4.2	6.5

iv)  $D_{hd} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	7.5	11.9
Στη θέση 7	3.76	6
Στη θέση 8	3.76	6

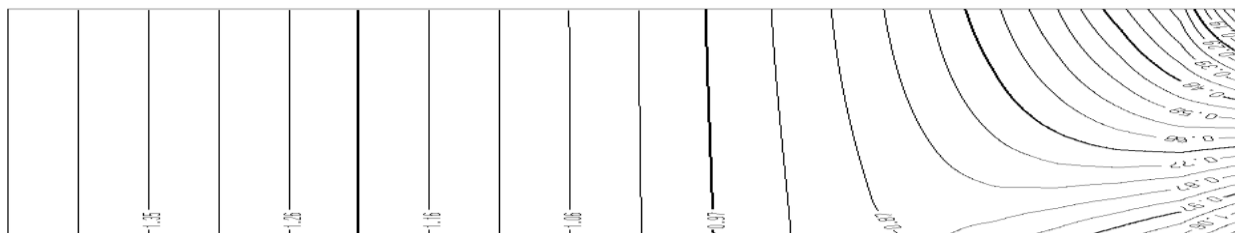
Για μεταβολή του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς από  $D_{hd} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  σε  $D_{hd} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  (αύξηση 300%), οι εισροές αυξάνονται 25% και οι εκροές 17%. Υπενθυμίζεται ότι για αντίστοιχες μεταβολές των συντελεστών διαμήκους και εγκάρσιας διασποράς η μεταβολή εισροών και εκροών ήταν αμελητέα (περίπου 0.3%).

### 7.2.3. Υδραυλική αγωγιμότητα K

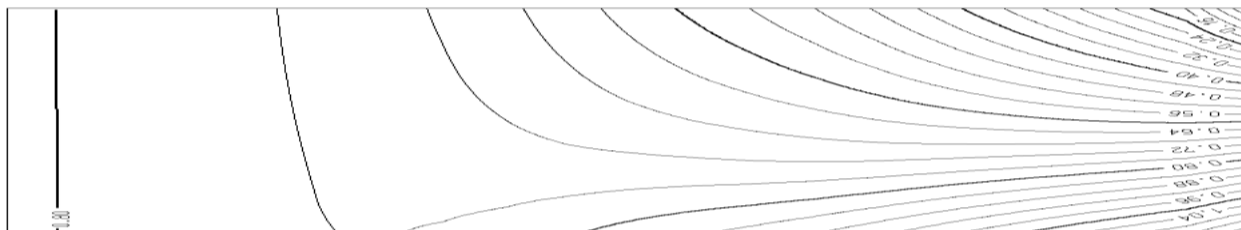
Στον οριζόντιο υδροφορέα πάχους  $b=50\text{m}$  εξετάστηκε η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στην υδραυλική αγωγιμότητα (K). Τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι : τομή στη θέση 5 – ισοδυναμικές, τομή στη θέση 5 - ισογραμμές της συγκέντρωσης , πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα. Η τομή πραγματοποιείται στη θέση πέντε (βλέπε εικόνα 6.5.1) και για απόσταση πεντακόσια μέτρα από το σύνορο-θαλασσα.

#### 7.2.3.1. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές

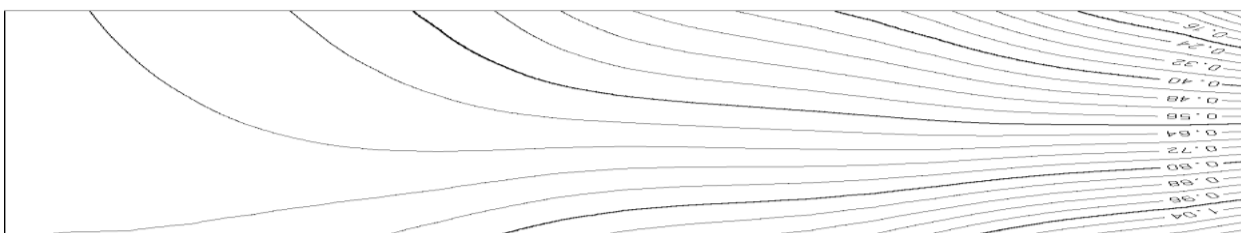
i)  $K=1,225 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



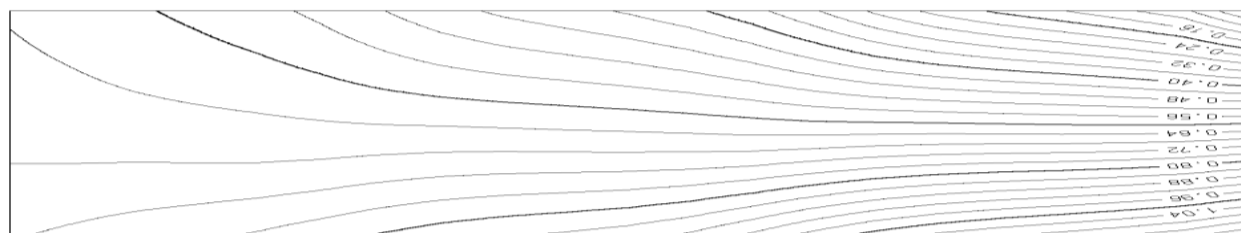
ii)  $K=5 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



iii)  $K=10 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

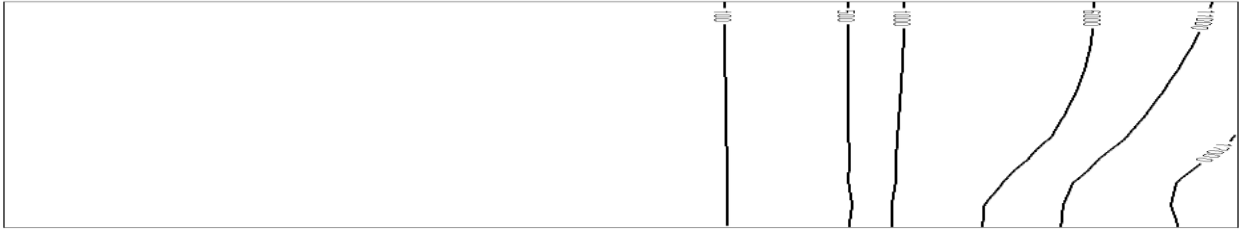


iv)  $K=15 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

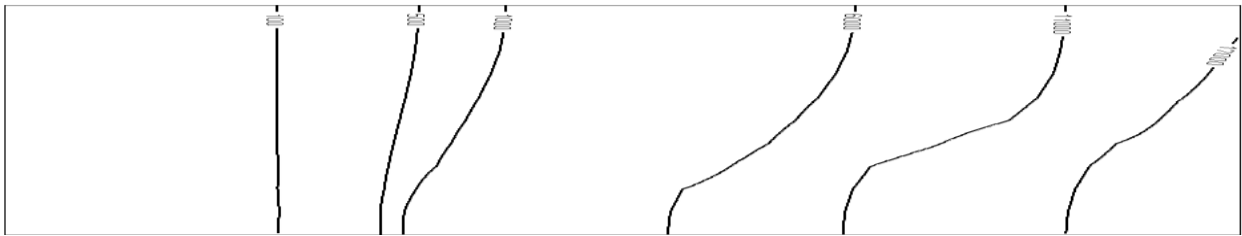


### 7.2.3.2. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης

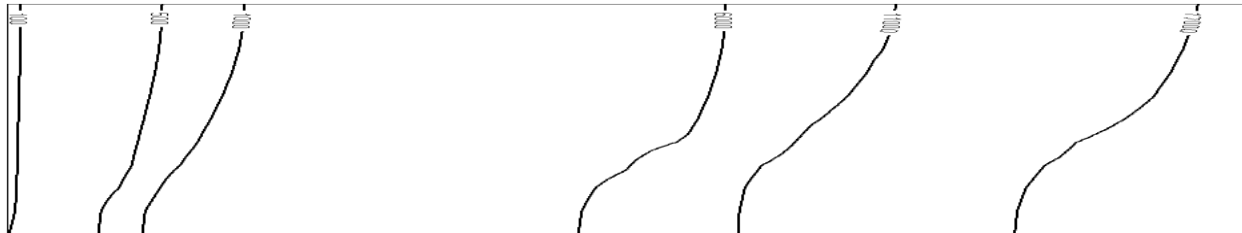
i)  $K = 1,225 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



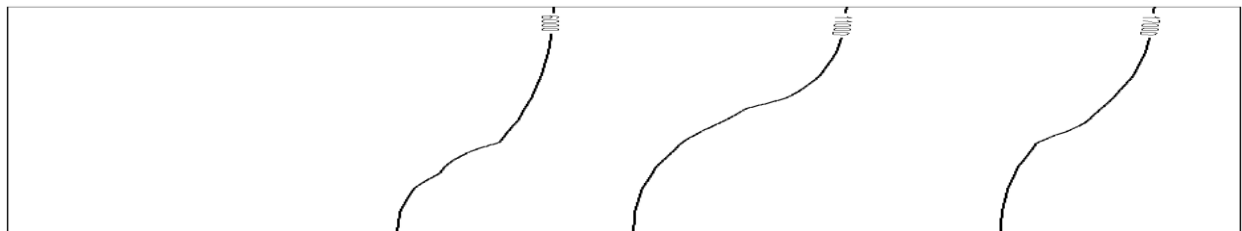
ii)  $K = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



iii)  $K = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



iv)  $K = 15 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$



### 7.2.3.3. Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο-θάλασσα

i)  $K = 1,225 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

ii)  $K = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	16.5	21
Στη θέση 7	8.3	10.6
Στη θέση 8	8.3	10.6

iii)  $K = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	25.5	30
Στη θέση 7	12.9	15.1
Στη θέση 8	12.9	15.1

iv)  $K = 15 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

	Εισροή από τη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ )
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	31.5	36
Στη θέση 7	15.9	18.2
Στη θέση 8	15.9	18.2

Διαπιστώνεται ο κυρίαρχος ρόλος της υδραυλικής αγωγιμότητας στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων. Η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει ως συνέπεια την αυξημένη κυκλοφορία νερού από και προς τη θάλασσα, το οποίο, όμως, όπως δείχνουν οι ισογραμμές της συγκέντρωσης είναι πολύ μεγαλύτερης αλατότητας.

## 8.Βασικά μοντέλα

Με τον όρο βασικό μοντέλο, στην παρούσα εργασία, αποκαλείται για κάθε μία από τις κατηγορίες υδροφορεών το μοντέλο που διαμορφώνεται μετά την σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων και την οριστικοποίηση κάναβου , στρώσεων και αριθμητικού σχήματος ,για κάθε μία από τις κατηγορίες υδροφορεών.

Κάθε βασικό μοντέλο παρουσιάζεται με:

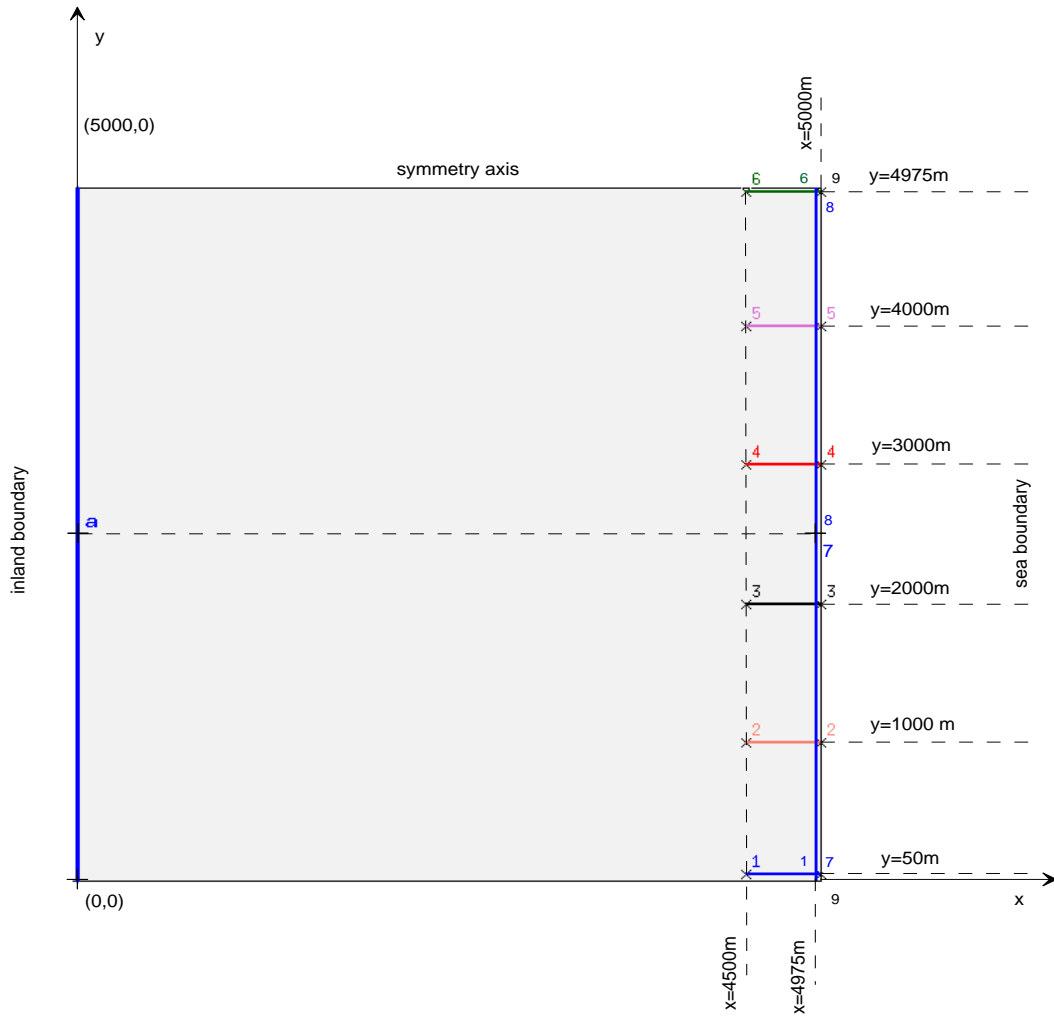
- 1)Πίνακα με τιμές βασικών μεγεθών και παραμέτρων
- 2)Τομή στη θέση 5 με τις ισοδυναμικές
- 3)Τομή στη θέση 5 με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 4)Τομή στη θέση 2 με τις ισοδυναμικές
- 5)Τομή στη θέση 2 με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 6)Απεικόνιση του slice10/slice20 (υδροφορείς σταθερού πάχους/υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους) με τις ισοδυναμικές
- 7)Απεικόνιση του slice10/slice20 (υδροφορείς σταθερού πάχους/υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους) με τις ισογραμμές της συγκέντρωσης
- 8)Πίνακα με τις ποσότητες εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού σε τομές επί του συνόρου-θάλασσα (θέσεις 7,8,9 )
- 9)Τιμές δυναμικού σε ορισμένα από τα σημεία παρατήρησης
- 10)Τιμές συγκέντρωσης σε ορισμένα από τα σημεία παρατήρησης

Οι θέσεις των τομών και των σημείων παρατήρησης περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 6.5. Στις απεικονίσεις των slices είναι δυνατόν να φαίνονται ορισμένα από τα σημεία παρατήρησης.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους οριζόντιους υδροφορείς και για τους υδροφορείς με κλίσεις πυθμένα  $m\alpha$  ή/και  $m\gamma$  ίση με 0.07. Τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες τιμές κλίσεων παρατίθενται στο παράρτημα.



Υπενθυμίζεται η εικόνα ενός slice και οι θέσεις των τομών πάνω σε αυτό (εικόνα 6.5.1).



segments projection on aquifer's ground plan

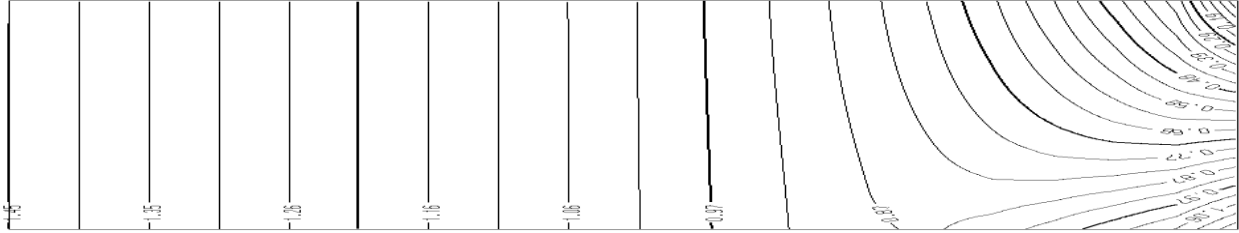
## 8Α. Υδροφορείς σταθερού ύψους (πάχους)

### 8Α.1. Οριζόντιος (Horizontal)

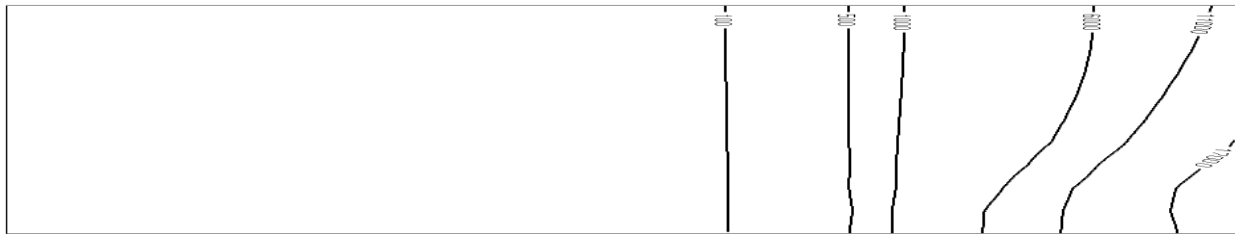
#### 8Α.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

Horizontal-basic model	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_x a / s_x h$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_x a / s_y h$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x = 0$ , $N_y = 0$

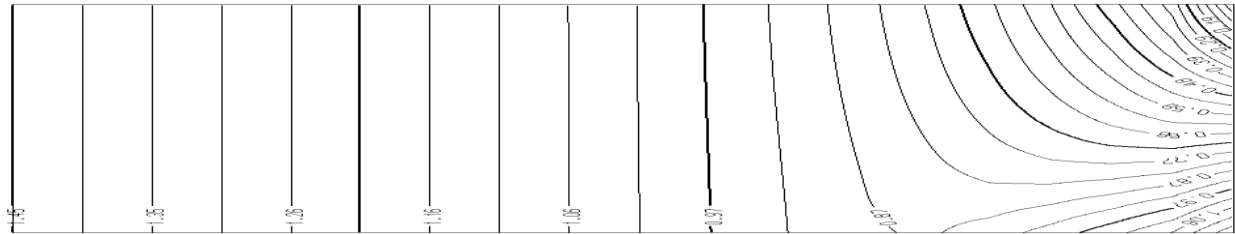
**8Α.1.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές**



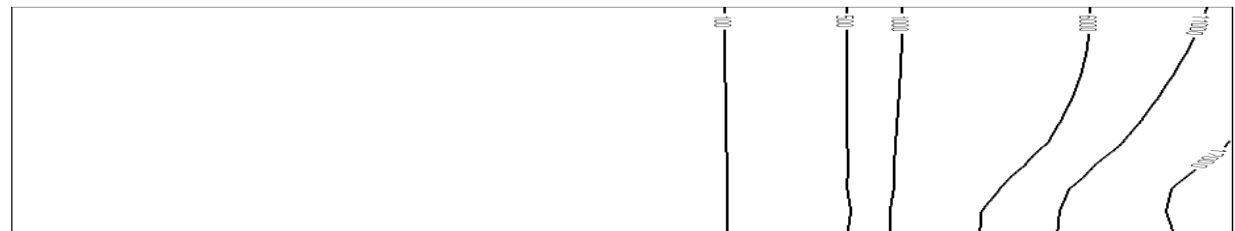
**8Α.1.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



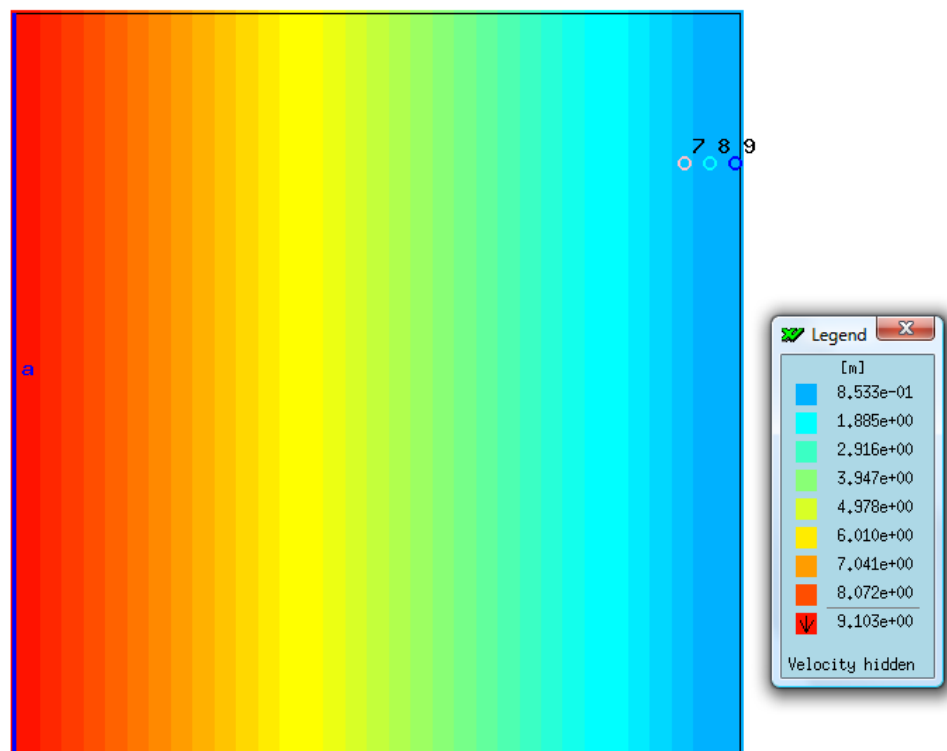
**8Α.1.4 Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές**



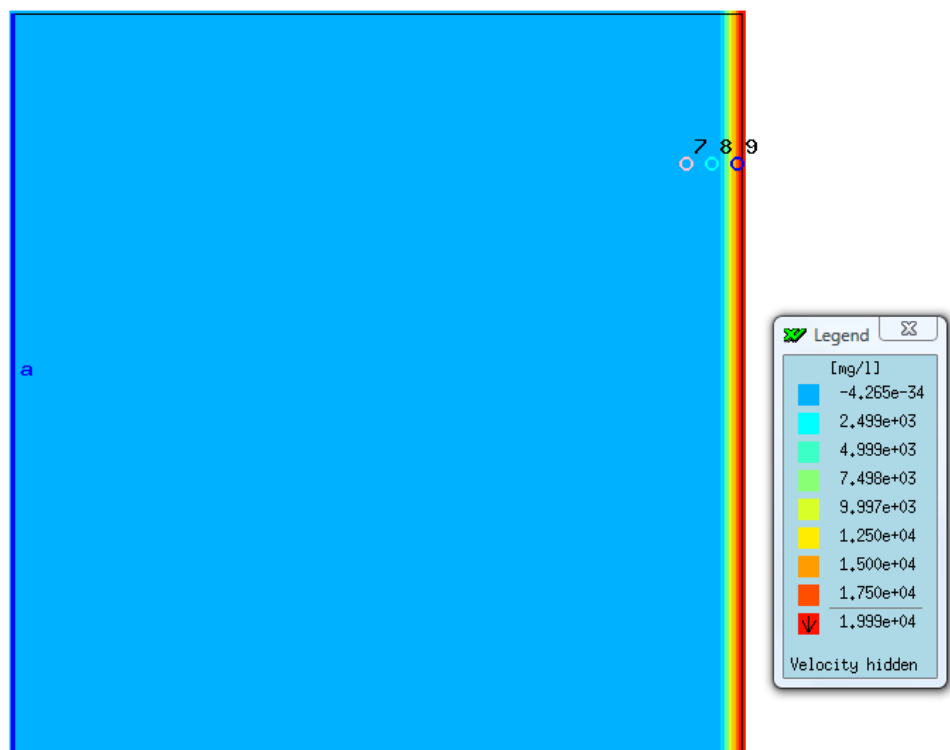
**8Α.1.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



### 8A.1.6. Slice 10 – Ισοδυναμικές



### 8A.1.7 Slice 10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.1.8 Πίνακας εισέρχοννου –εξερχόμενου νερού στο σύνορο –θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα( $10^3$ m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα ( $10^3$ m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

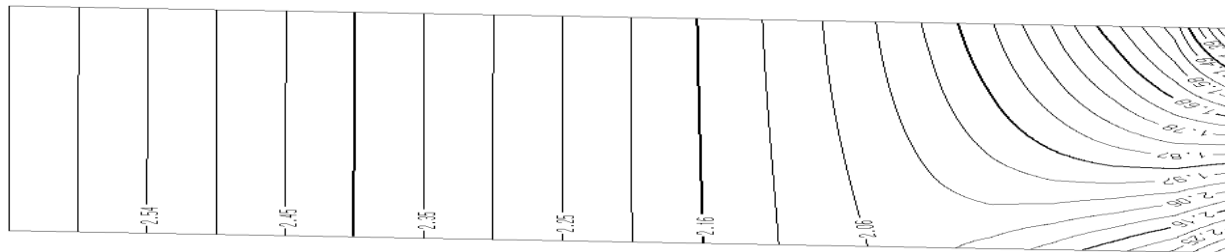
## 8Α.2. Υδροφορείς με κλίση $m_x$ κάθετη προς το σύνορο- θάλασσα (seawards sloping)

### 8Α.2.1. $m_x=0.01$

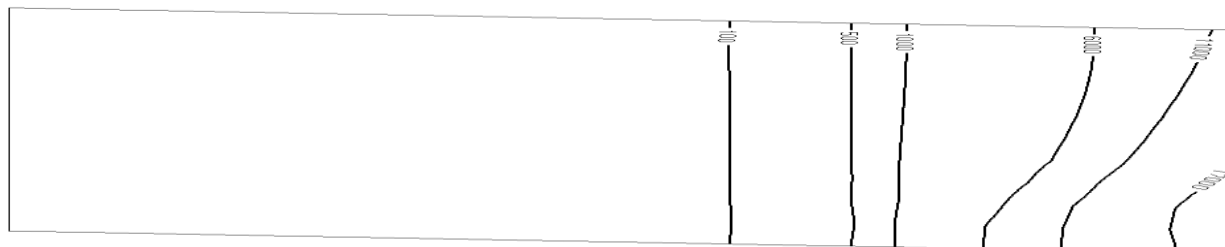
#### 8Α.2.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping –<math>m_x=0.01</math>-basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.01
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.147$ , $N_y=0$

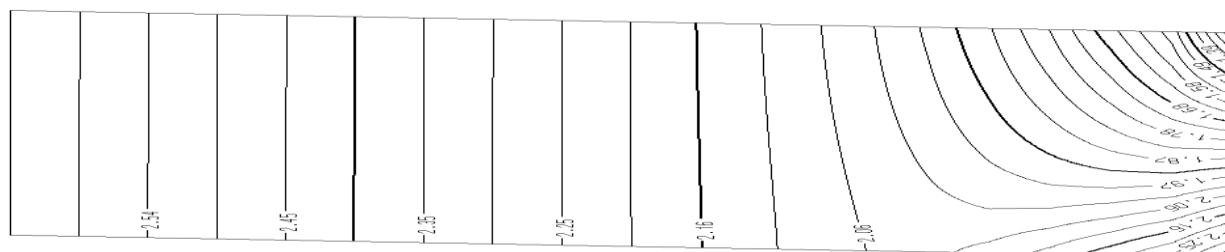
#### 8Α.2.1.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



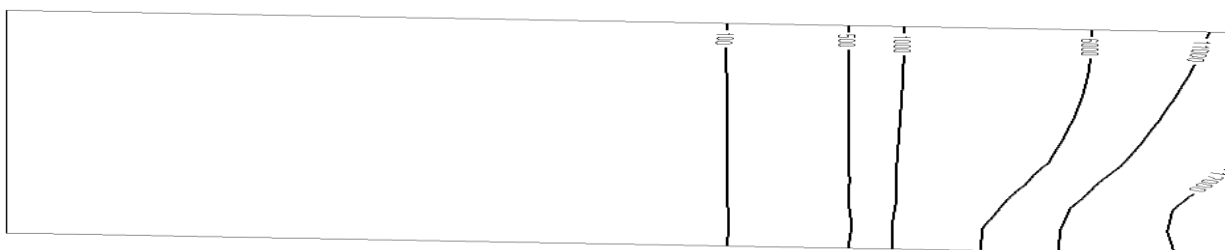
#### 8Α.2.1.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



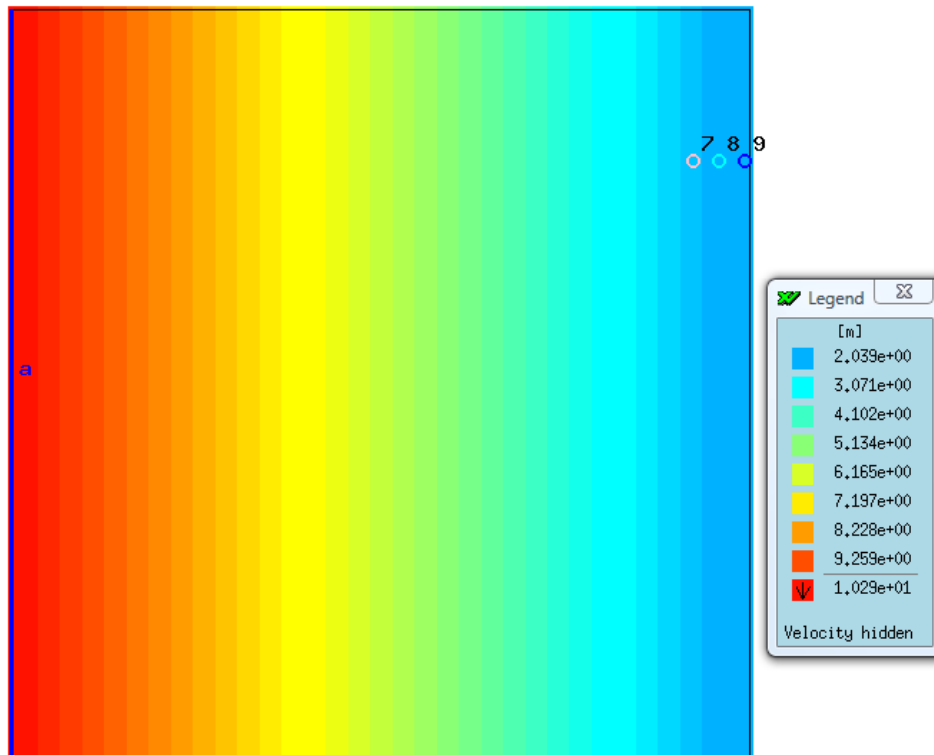
#### 8Α.2.1.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



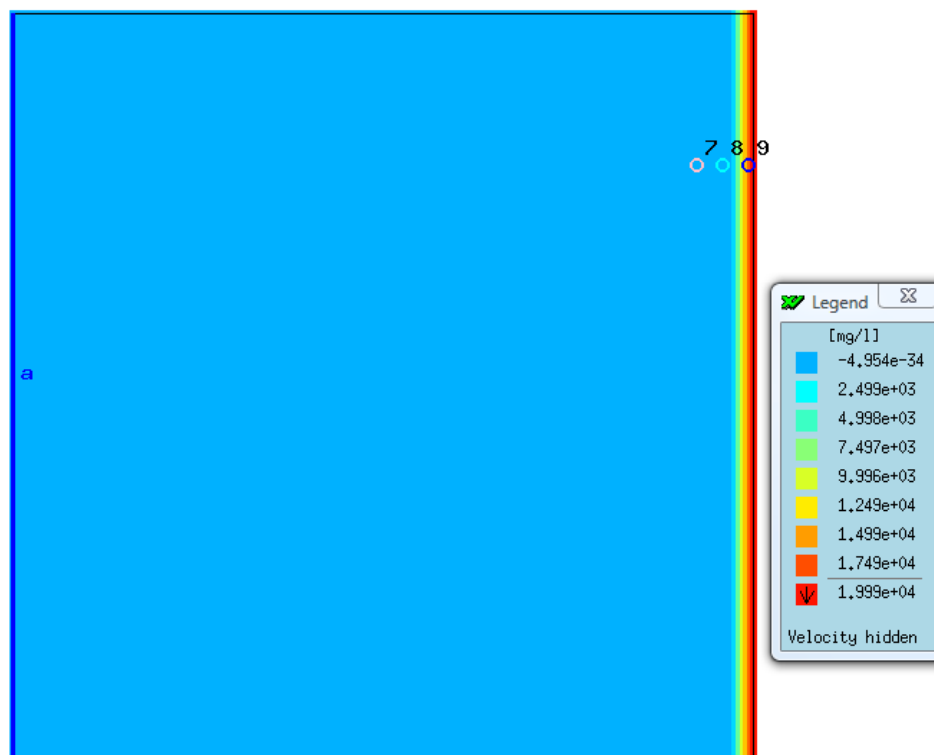
#### 8Α.2.1.5.Τομή στη θέση 2 –Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.2.1.6. Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.2.1.7. Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.2.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

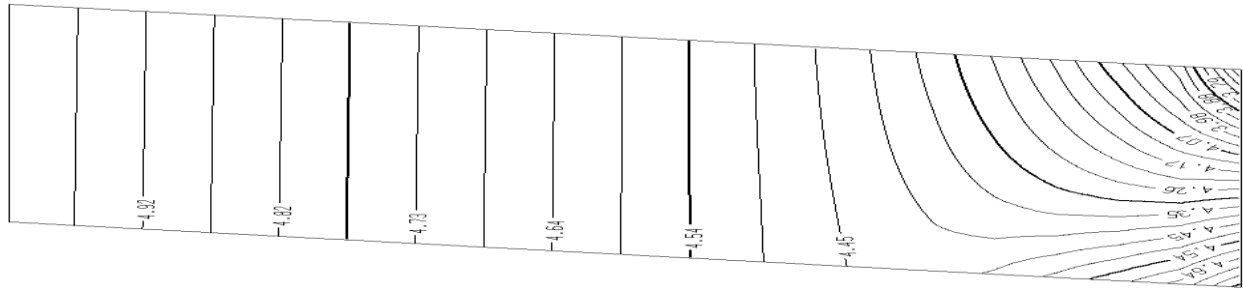
	Εισροή νερού από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή νερού στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

### 8A.2.2. $m_x=0.03$

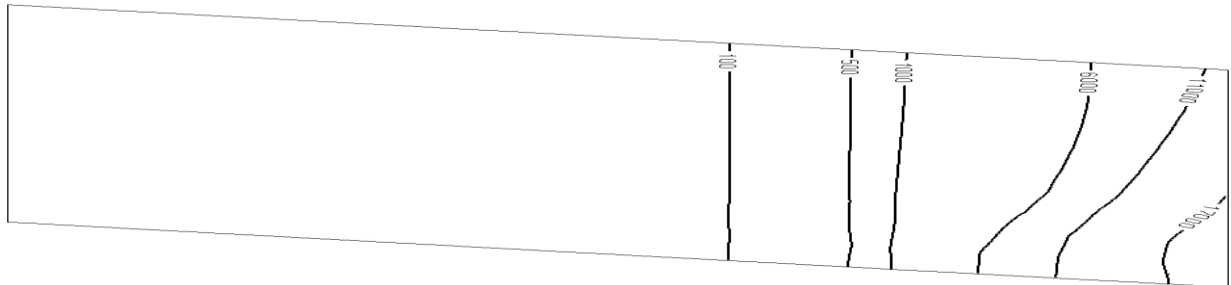
#### 8A.2.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping – <math>m_x=0.03</math> , basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.03
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xp}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yp}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.441$ , $N_y=0$

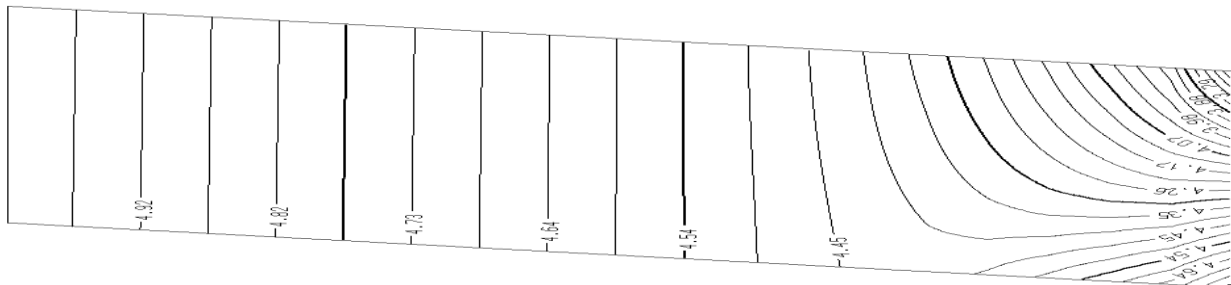
#### 8A.2.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



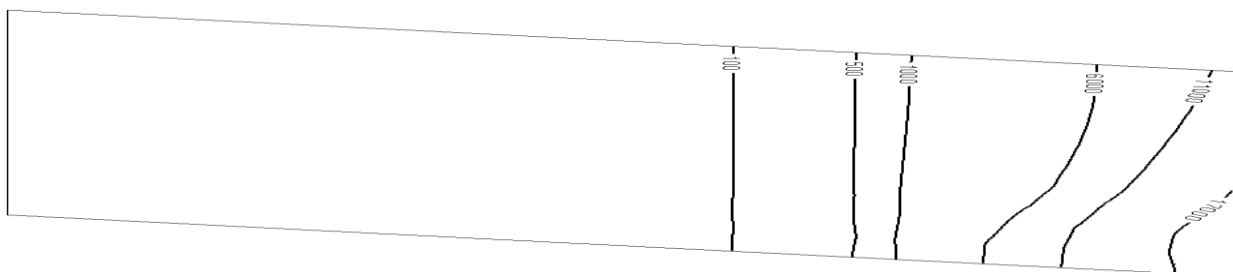
#### 8A.2.2.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



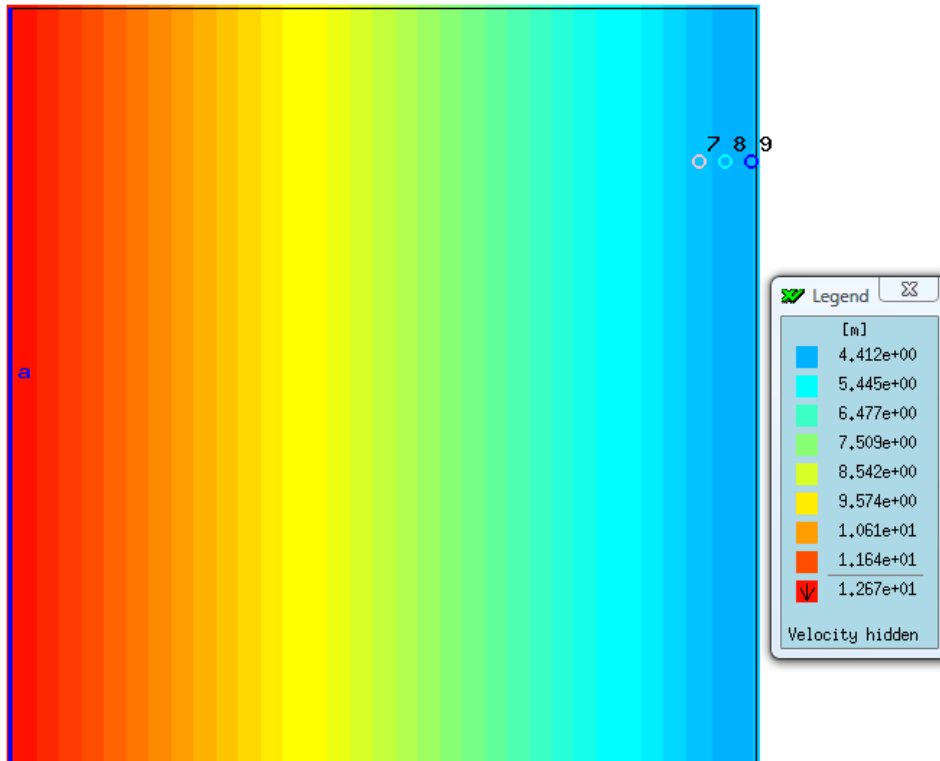
#### 8A.2.2.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



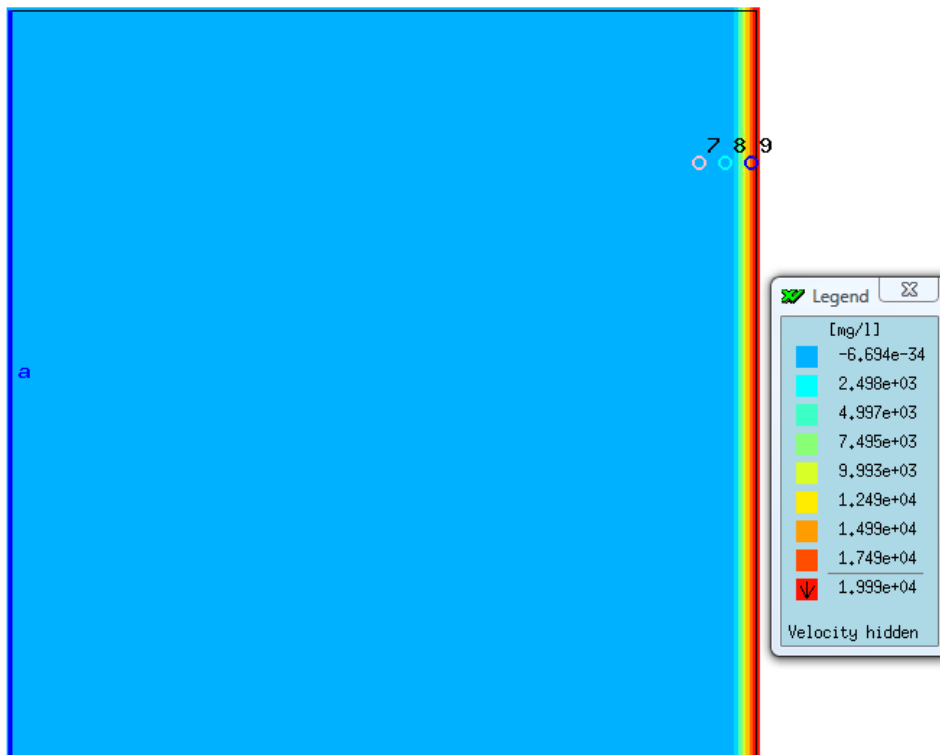
#### 8A.2.2.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.2.2.6. Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.2.2.7. Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.2.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα(θέση 9)	6.4	10.9
Στη θέση 7	3.2	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.5

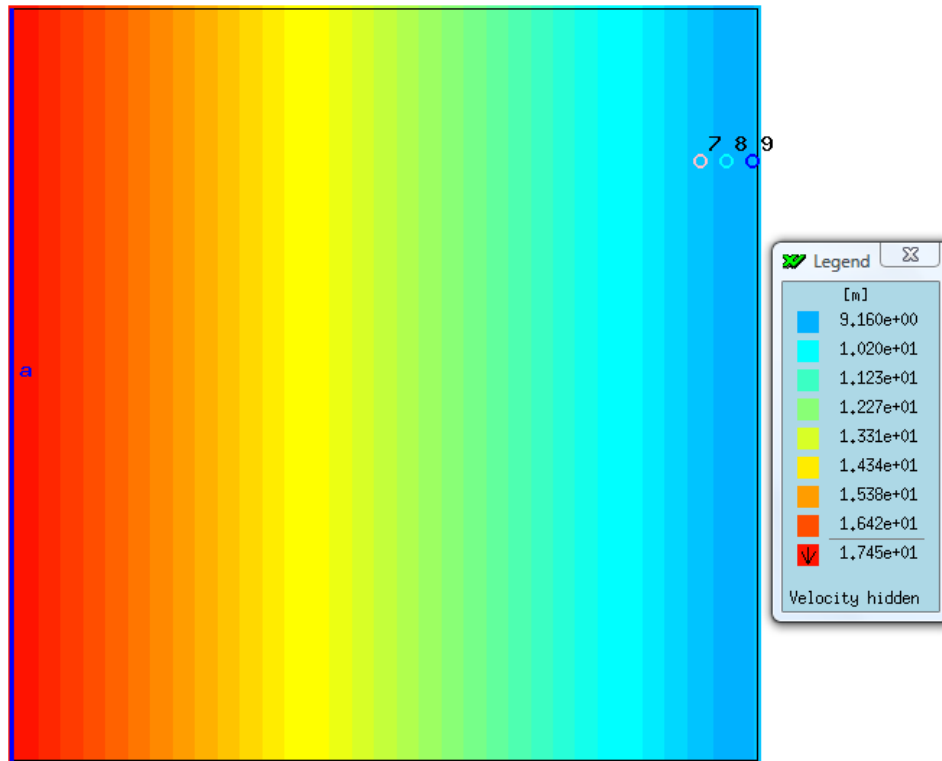
### 8A.2.3. $m_x=0.07$

#### 8A.2.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

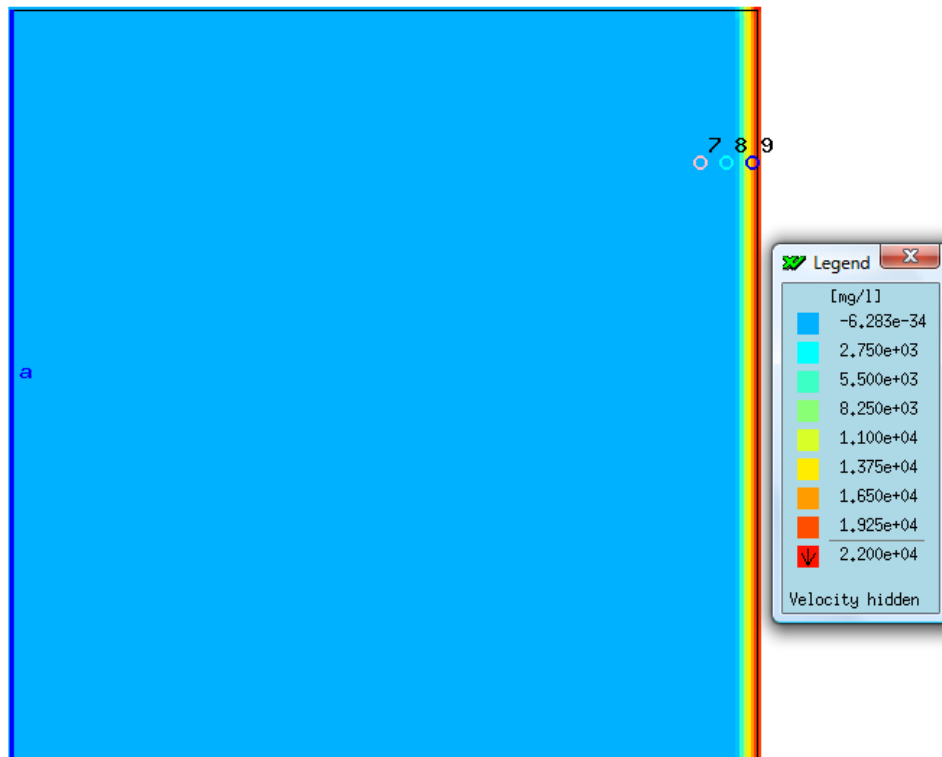
<b>Seawards sloping – <math>m_x=0.07</math> , basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.07
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.029$ , $N_y=0$



#### 8A.2.3.6. Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.2.3.7. Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.2.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

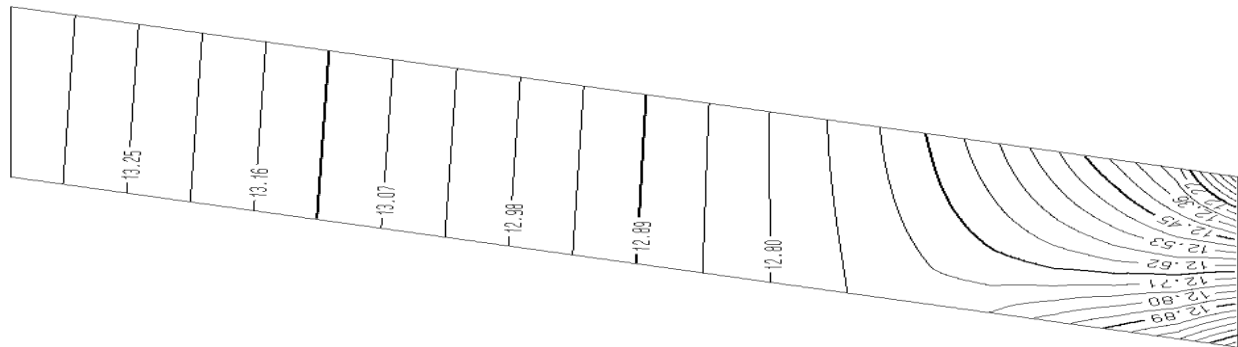
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα(θέση 9)	6.38	10.88
Στη θέση 7	3.21	5.5
Στη θέση 8	3.2	5.48

#### 8A.2.4. $m\alpha=0.1$

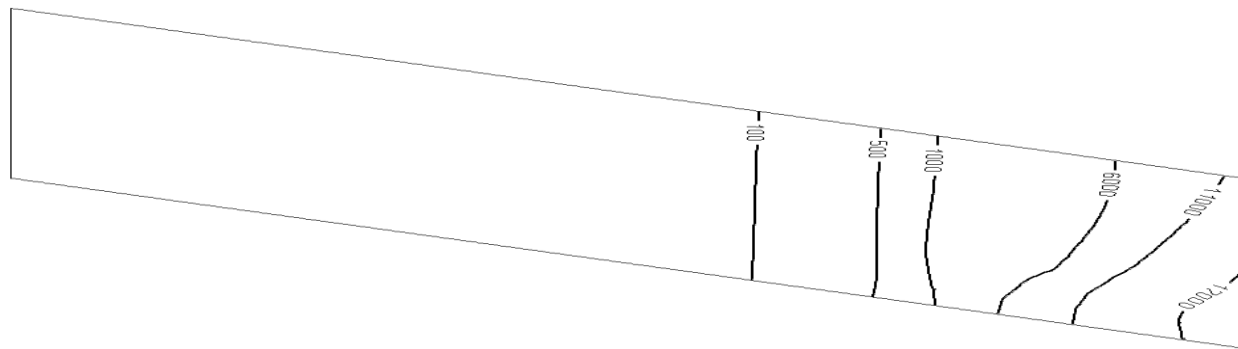
##### 8A.2.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping – <math>m\alpha=0.1</math> , basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $\alpha_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $\alpha_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m\alpha$	0.1
Κλίση $m\gamma$	0
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.47$ , $N_y=0$

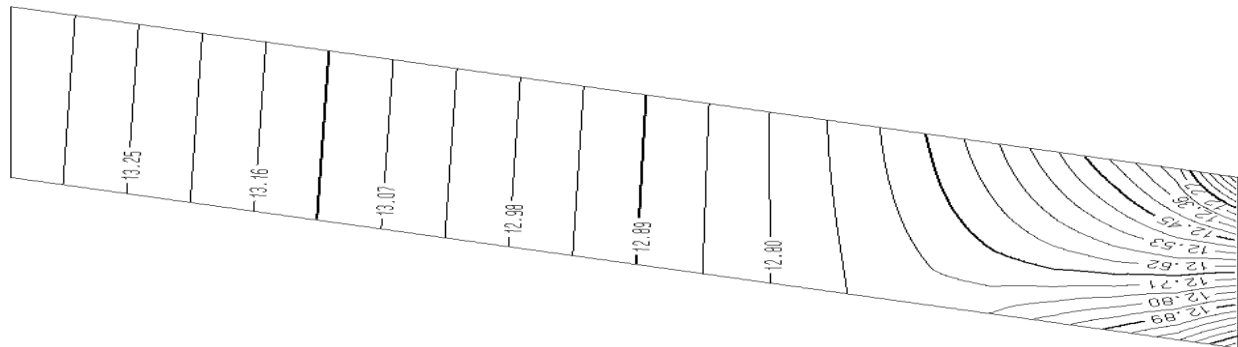
#### 8A.2.4.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



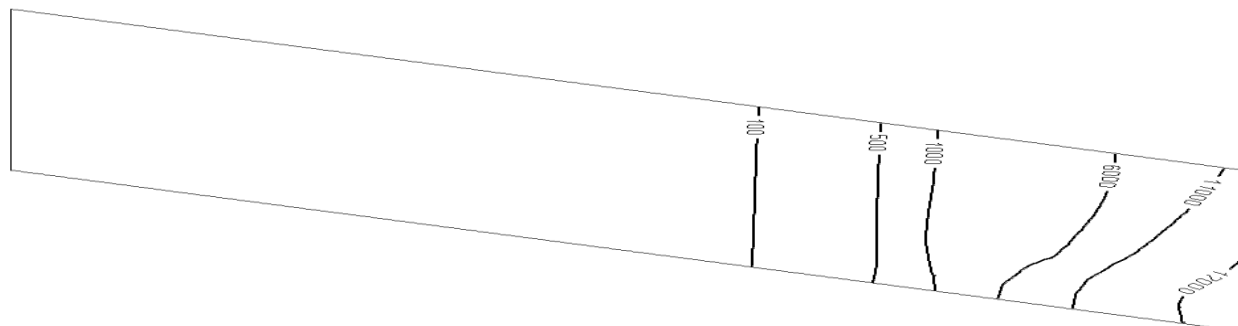
#### 8A.2.4.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



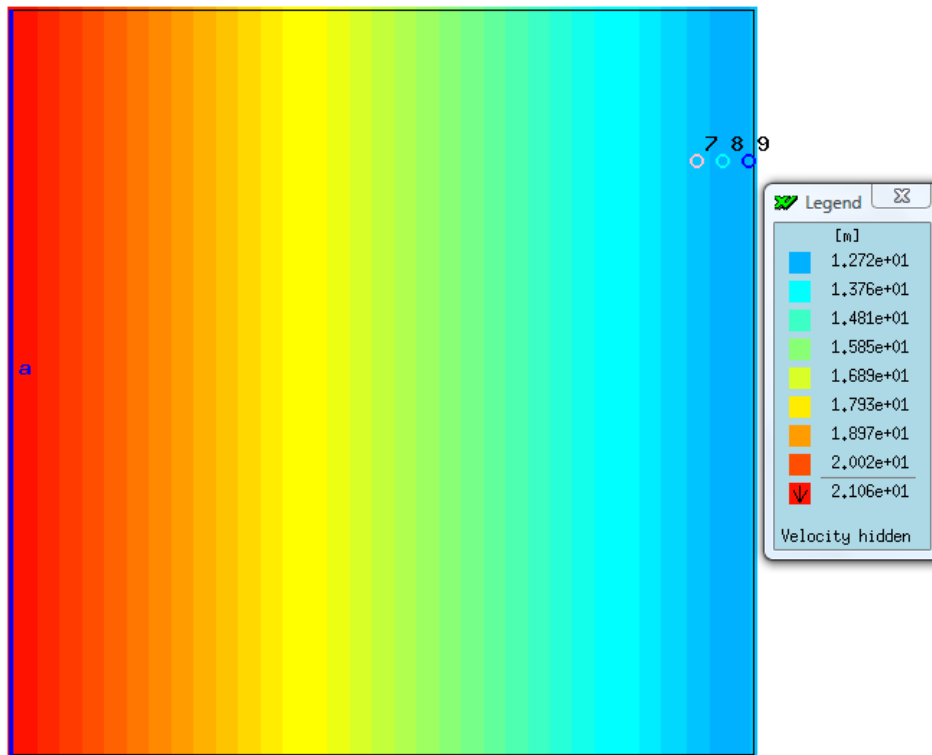
#### 8A.2.4.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



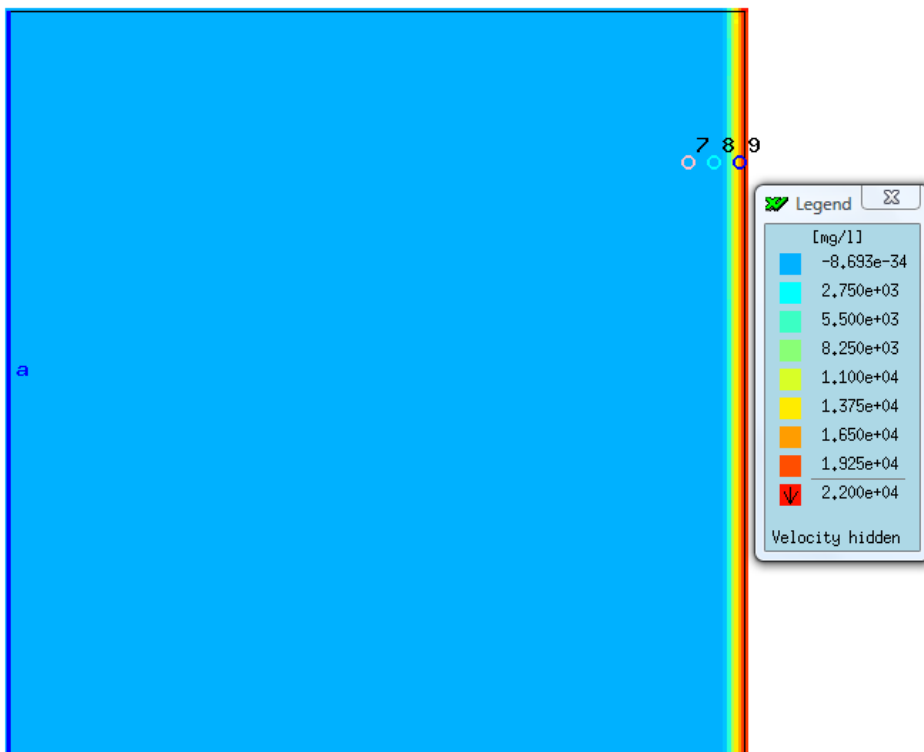
#### 8A.2.4.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.2.4.6. Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.2.4.7. Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.2.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.3	10.8
Στη θέση 7	3.2	5.4
Στη θέση 8	3.2	5.4

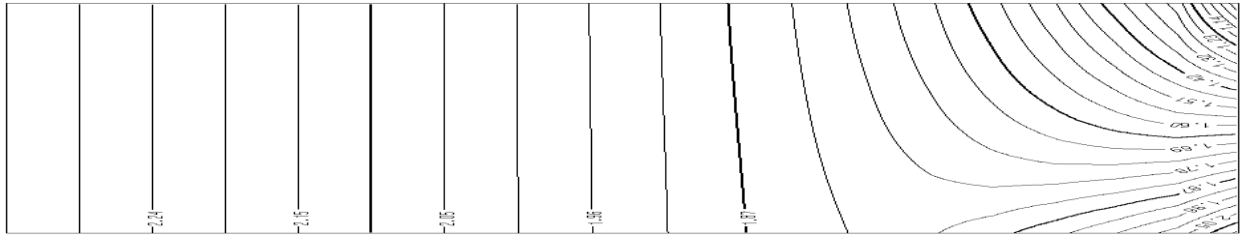
### 8Α.3. Υδροφορέας με κλίση $m_y$ παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (v-shaped)

#### 8Α.3.1. $m_y=0.01$

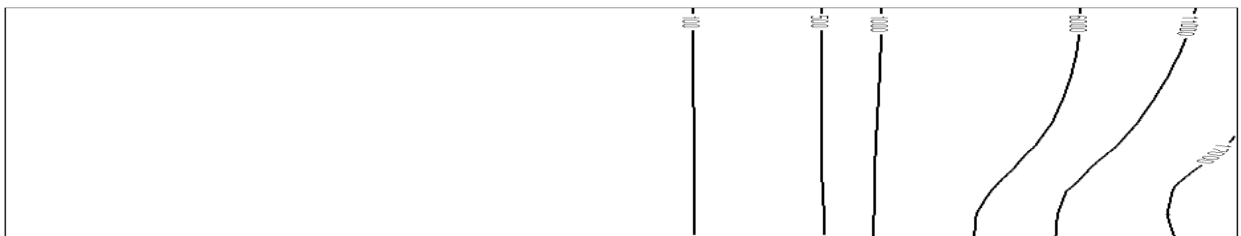
##### 8Α.3.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V-shaped –<math>m_y=0.01</math>-basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.01
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0.147$

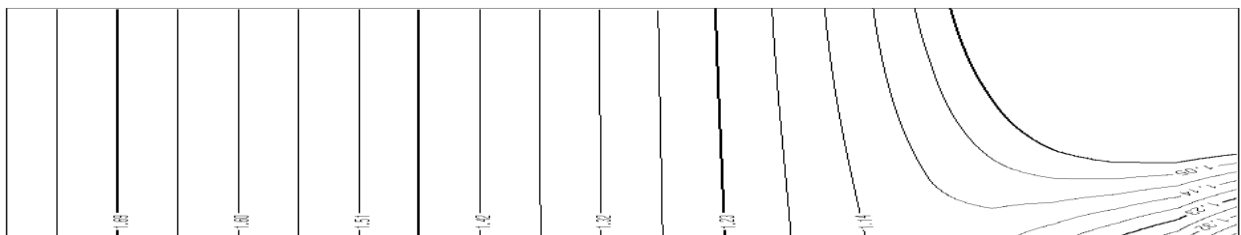
#### 8Α.3.1.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



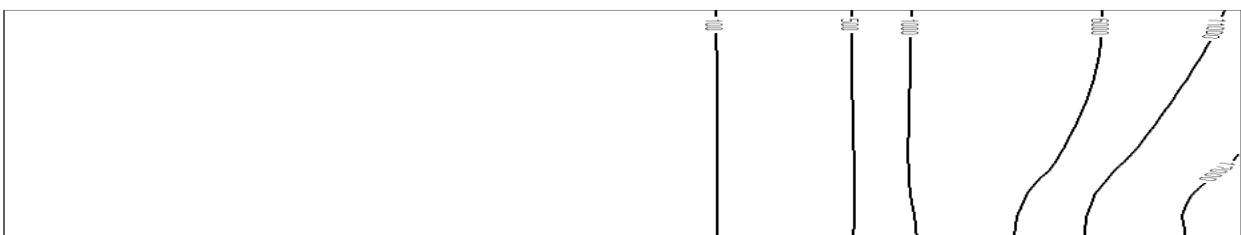
#### 8Α.3.1.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



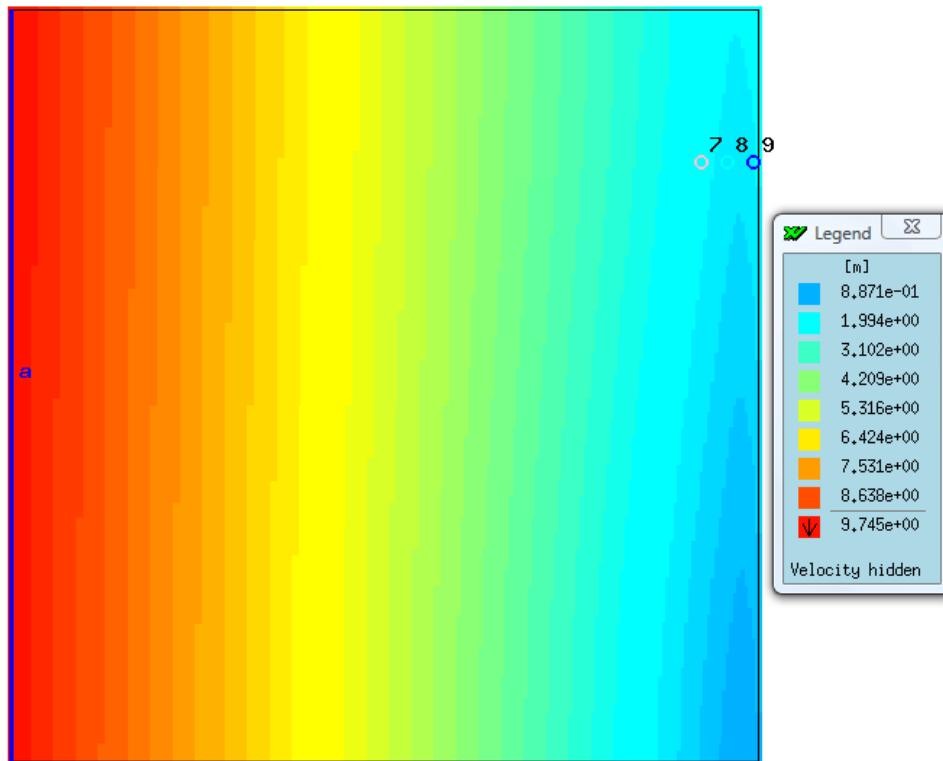
#### 8Α.3.1.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



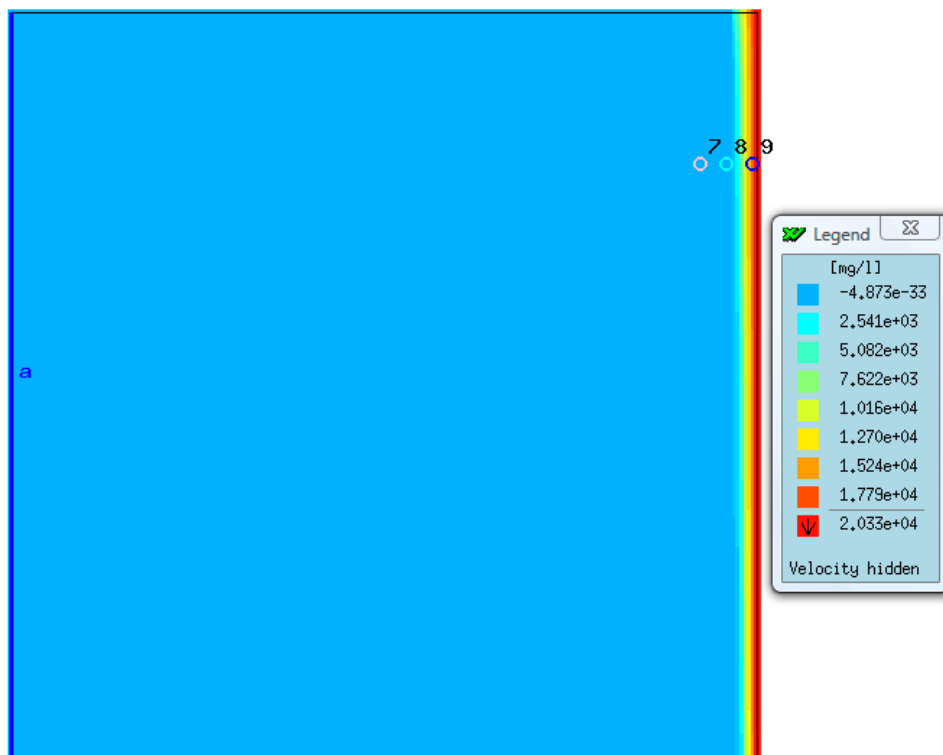
#### 8Α.3.1.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.3.1.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.3.1.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.3.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

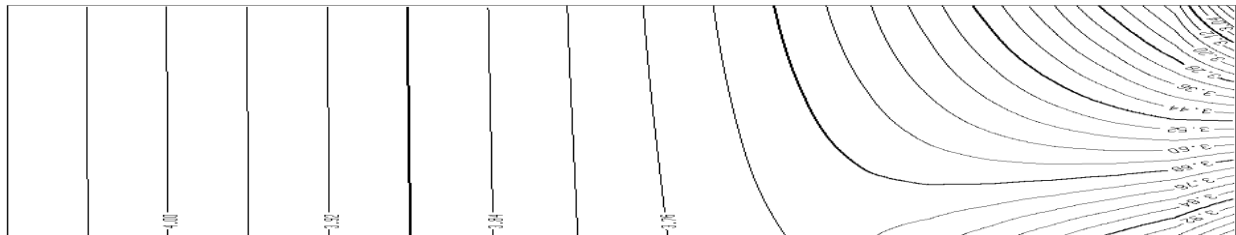
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.42	10.9
Στη θέση 7	3.32	5.83
Στη θέση 8	3.16	5.2

### 8A.3.2. $my=0.03$

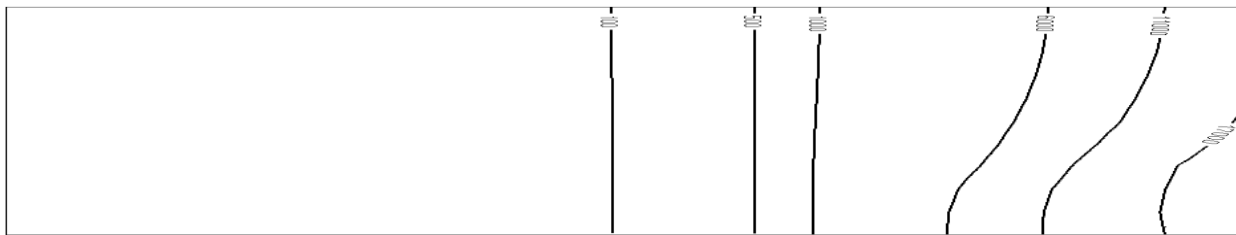
#### 8A.3.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V-shaped – <math>my=0.03</math> , basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.03
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0.441$

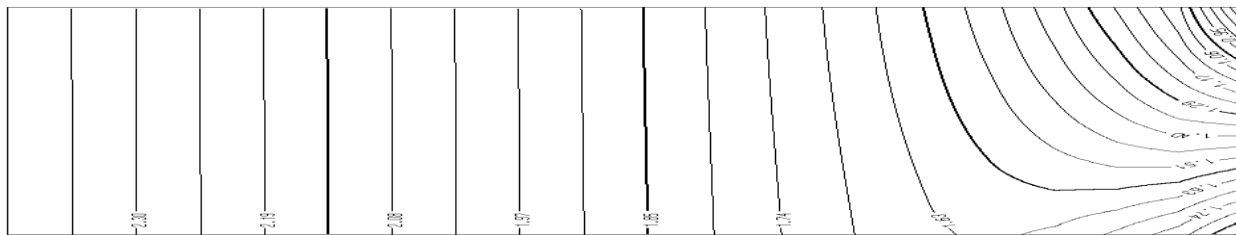
#### 8A.3.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



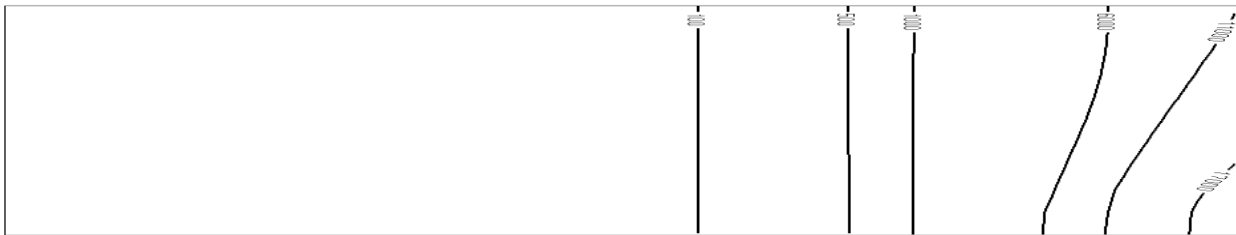
#### 8A.3.2.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



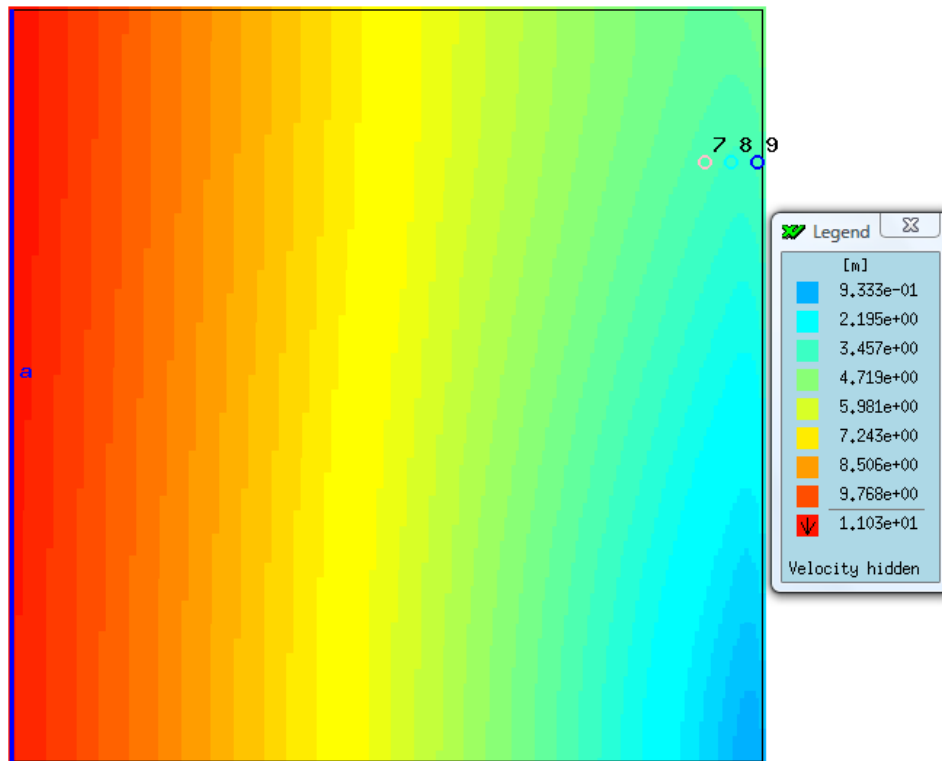
#### 8A.3.2.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



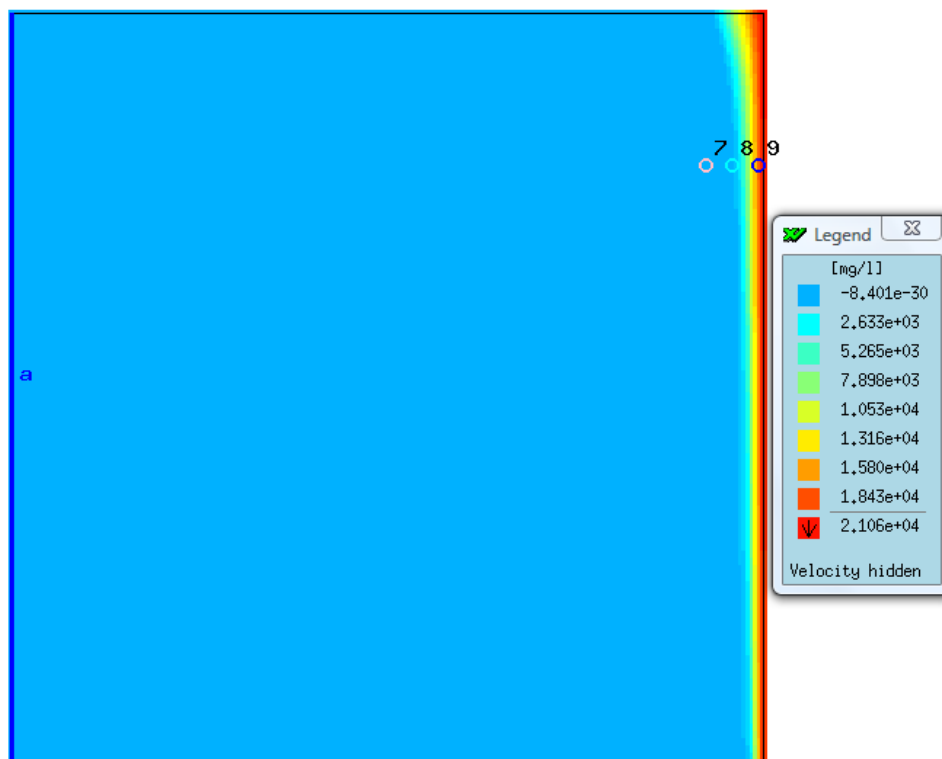
#### 8A.3.2.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.3.2.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.3.2.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.3.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.3	10.8
Στη θέση 7	3.5	6.4
Στη θέση 8	2.9	4.5

### 8A.3.3. $my=0.07$

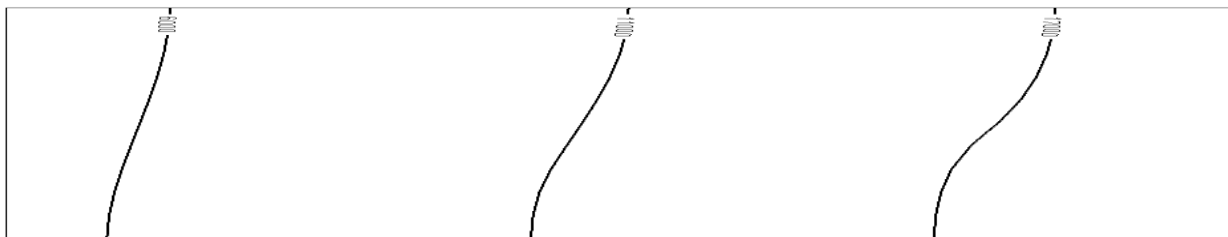
#### 8A.3.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V-shaped – <math>my=0.07</math> , basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.07
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=1.029$

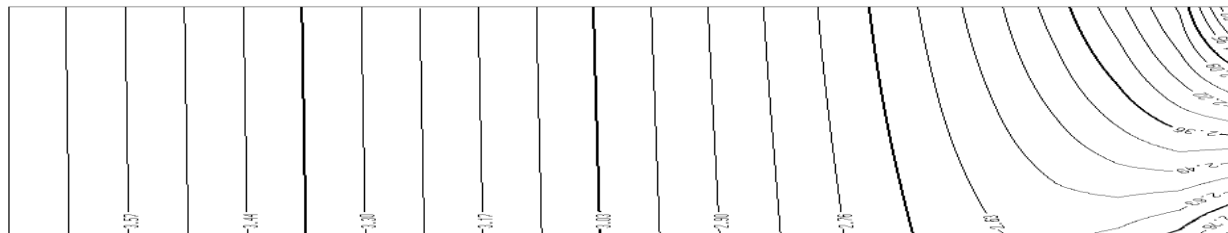
#### 8Α.3.3.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



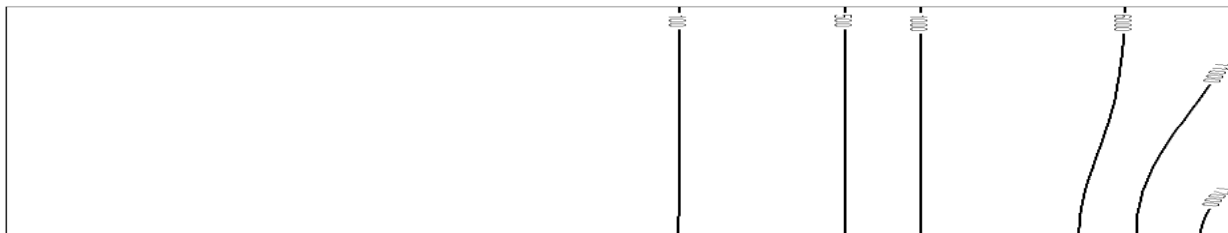
#### 8Α.3.3.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



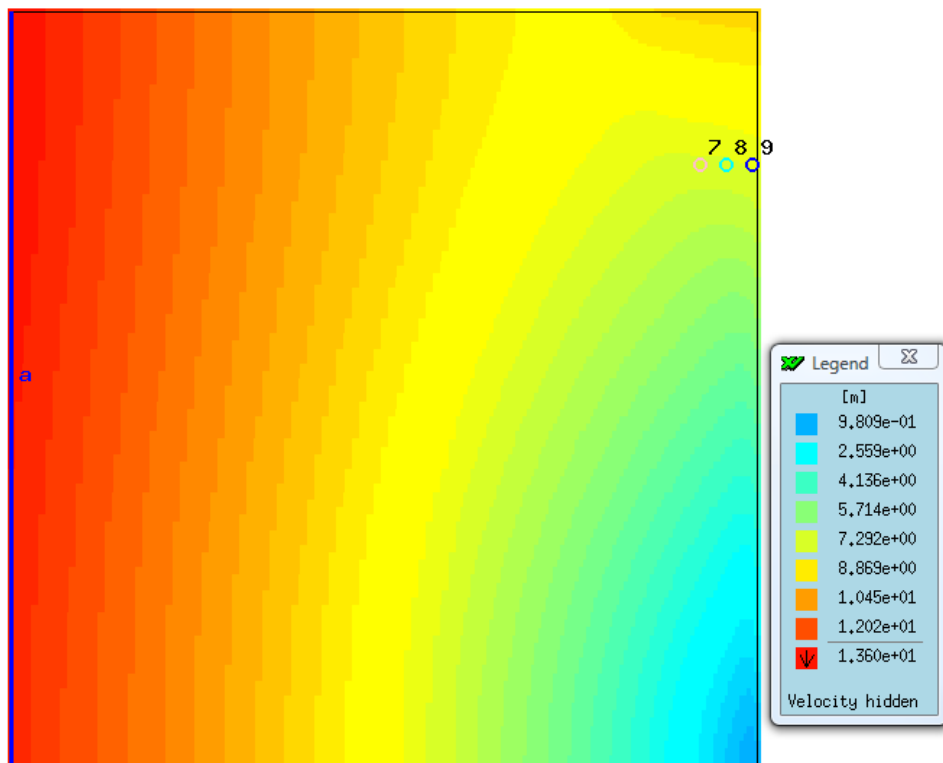
#### 8Α.3.3.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



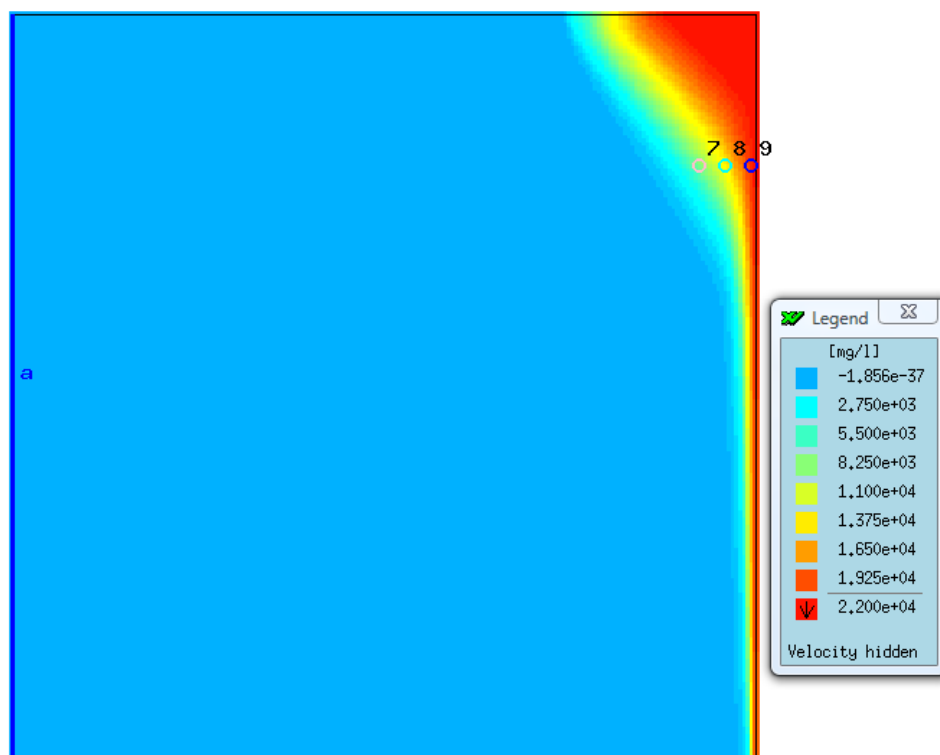
#### 8Α.3.3.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.3.3.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.3.3.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.3.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

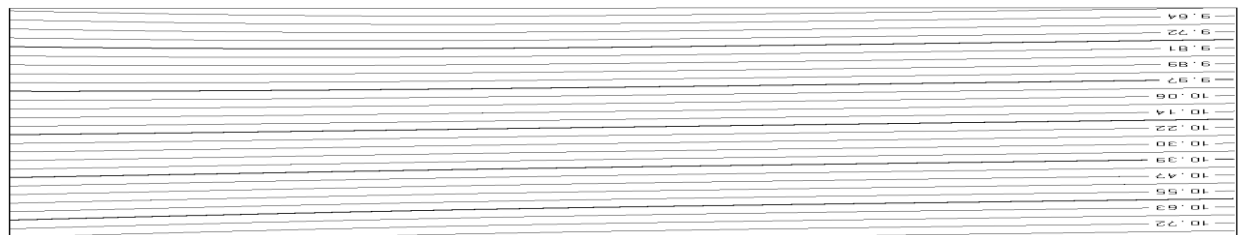
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	5.14	9.64
Στη θέση 7	3.58	7.43
Στη θέση 8	1.62	2.32

### 8A.3.4. $my=0.1$

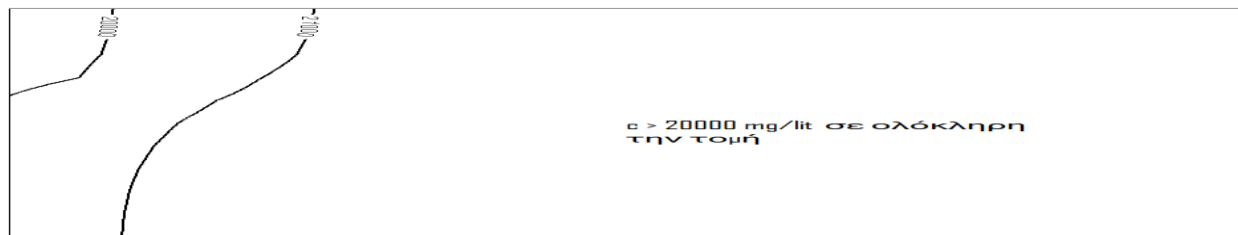
#### 8A.3.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V-shaped –<math>my=0.1</math>-basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.01
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xp}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yp}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=1.47$

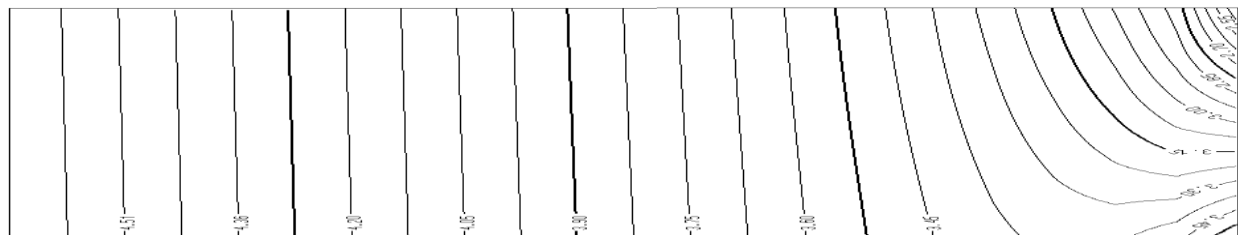
#### 8Α.3.4.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



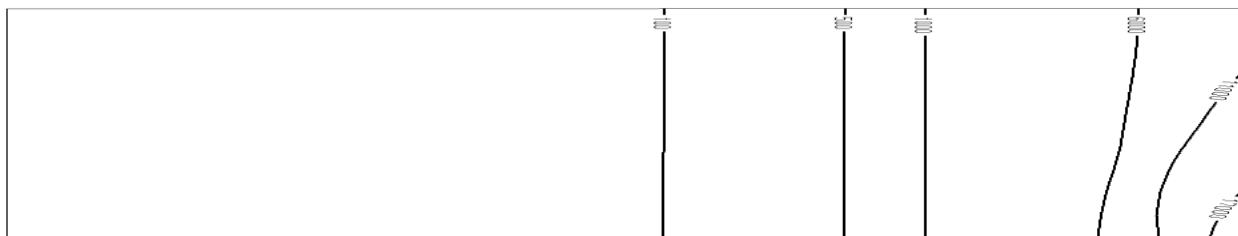
#### 8Α.3.4.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



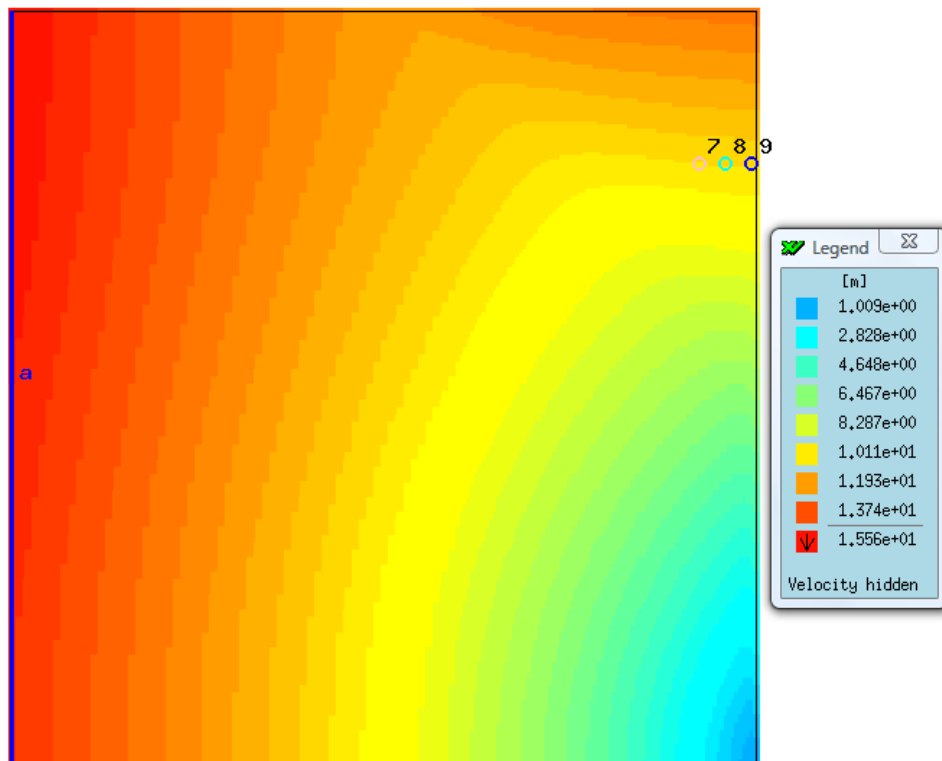
#### 8Α.3.4.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



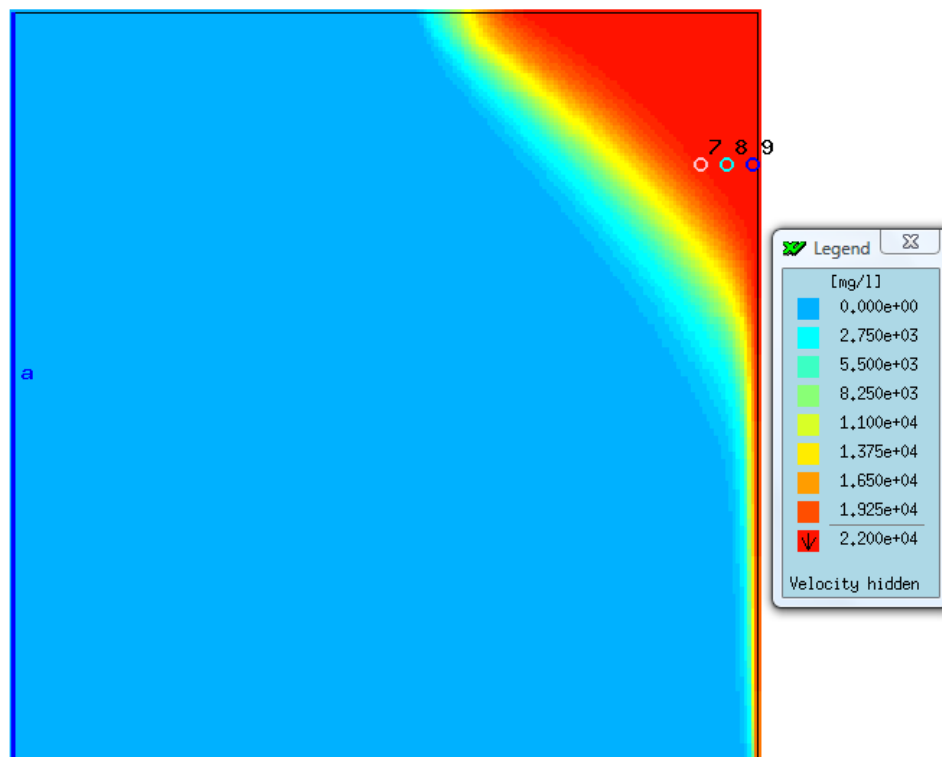
#### 8Α.3.4.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.3.4.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.3.4.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.3.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	4.31	8.81
Στη θέση 7	3.59	8
Στη θέση 8	0.78	0.92

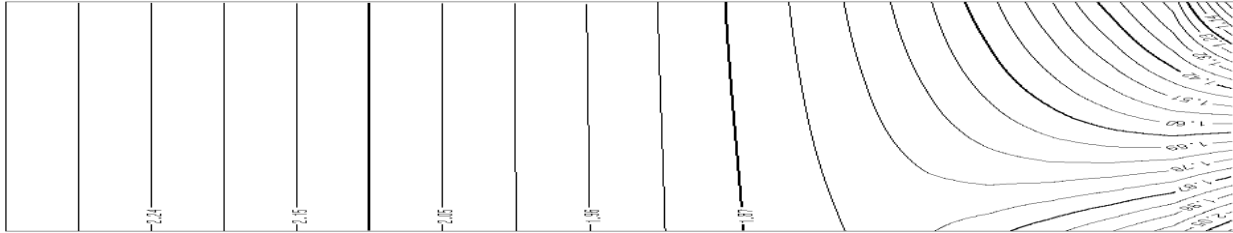
#### 8Α.4. Υδροφορείς με κλίση $m_x$ κάθετη προς το σύνορο – θάλασσα & κλίση $m_y$ παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (warped)

##### 8Α.4.1. $m_x=0.01$ & $m_y=0.01$

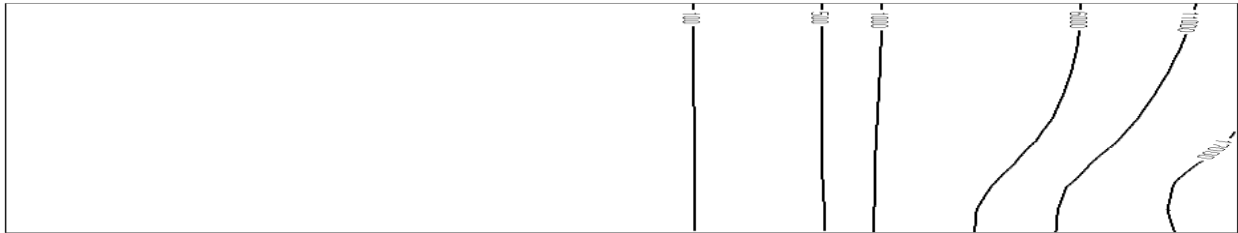
##### 8Α.4.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped – <math>m_x=0.01</math> , <math>m_y=0.01</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.01
Κλίση $m_y$	0.01
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.147$ , $N_y=0.147$

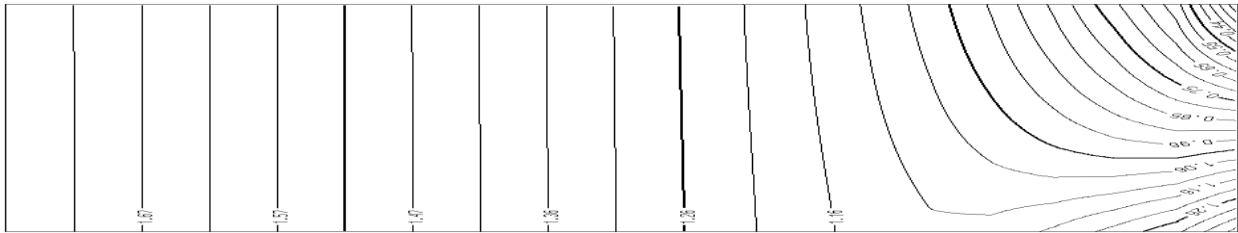
#### 8A.4.1.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



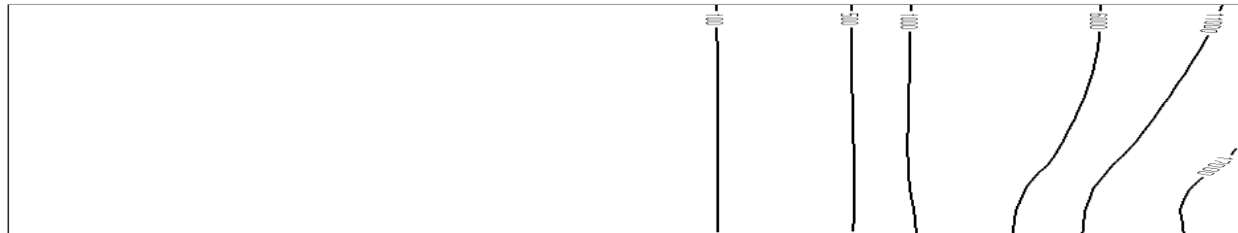
#### 8A.4.1.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



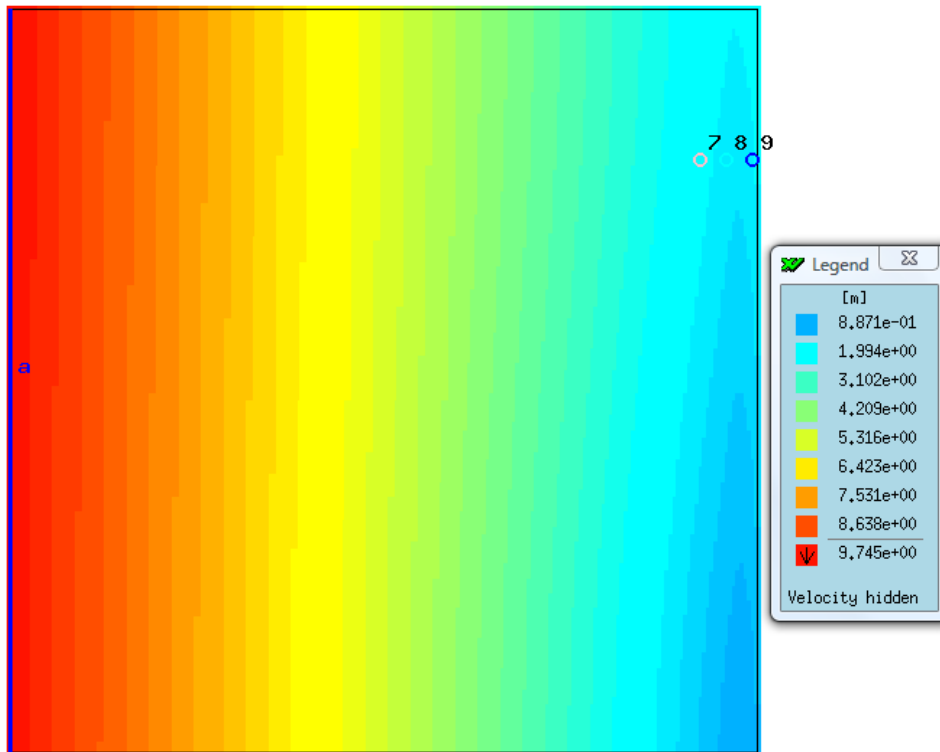
#### 8A.4.1.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



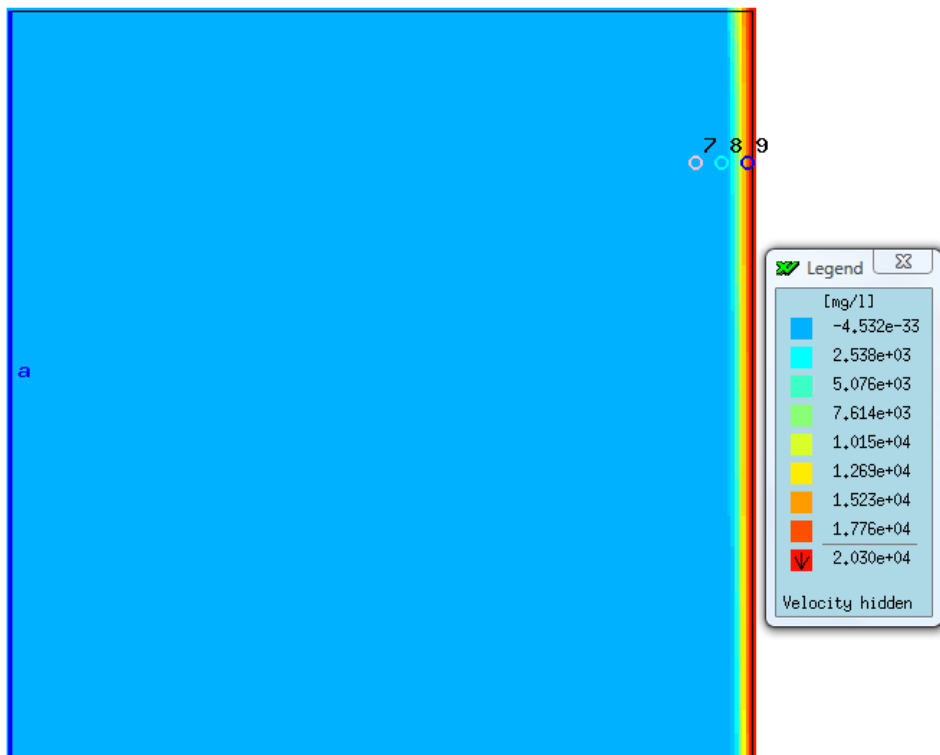
#### 8A.4.1.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.4.1.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.4.1.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.4.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

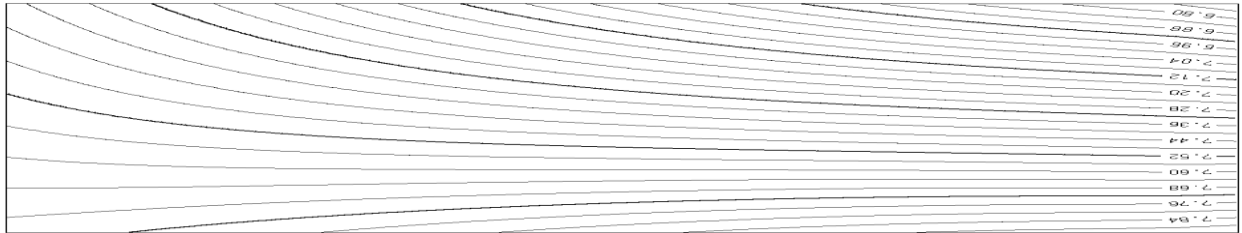
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.42	10.9
Στη θέση 7	3.33	5.83
Στη θέση 8	3.16	5.2

### 8A.4.2. $m_x=0.03$ & $m_y=0.03$

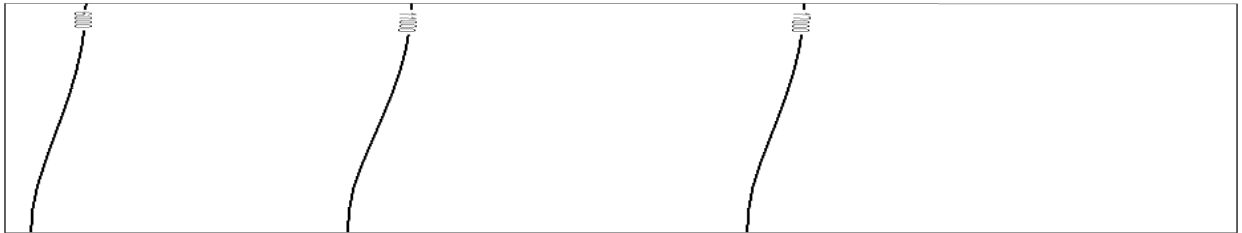
#### 8A.4.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped – <math>m_x=0.03</math> , <math>m_y=0.03</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.03
Κλίση $m_y$	0.03
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.441$ , $N_y=0.441$

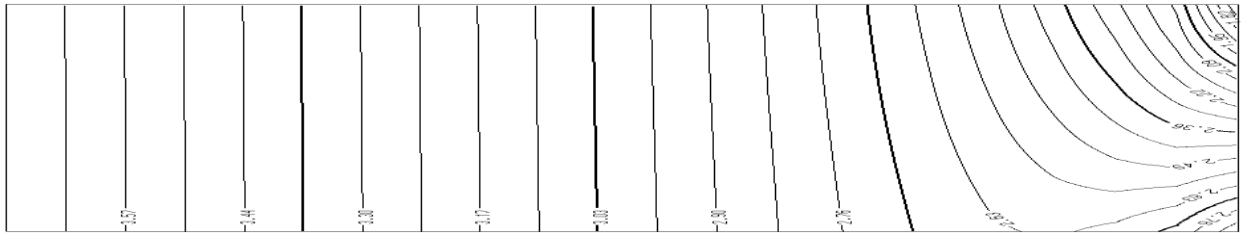
#### 8A.4.2.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



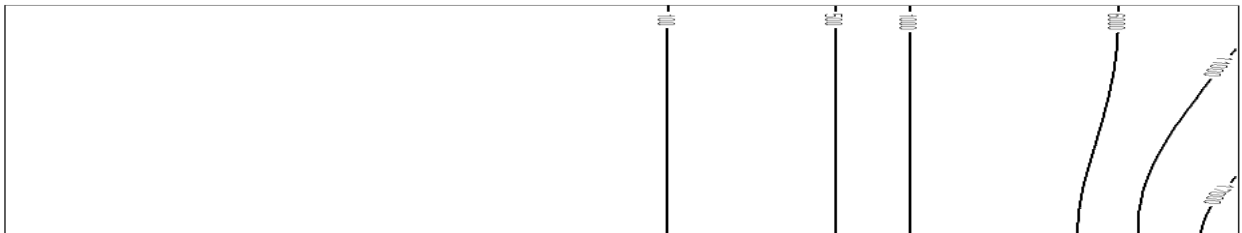
#### 8A.4.2.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



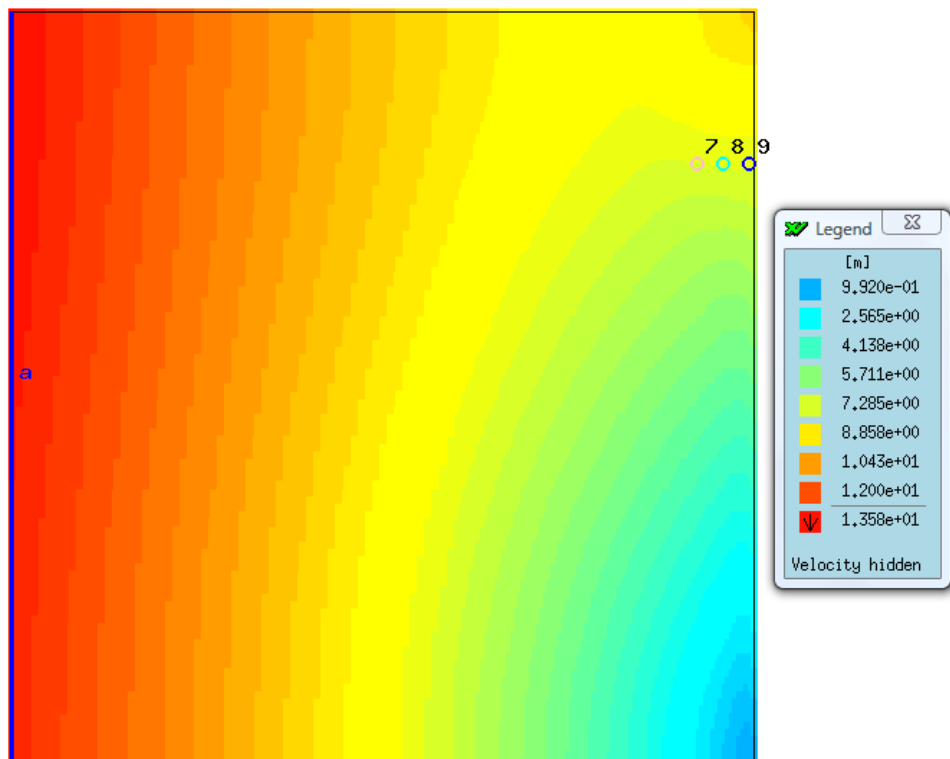
#### 8A.4.2.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



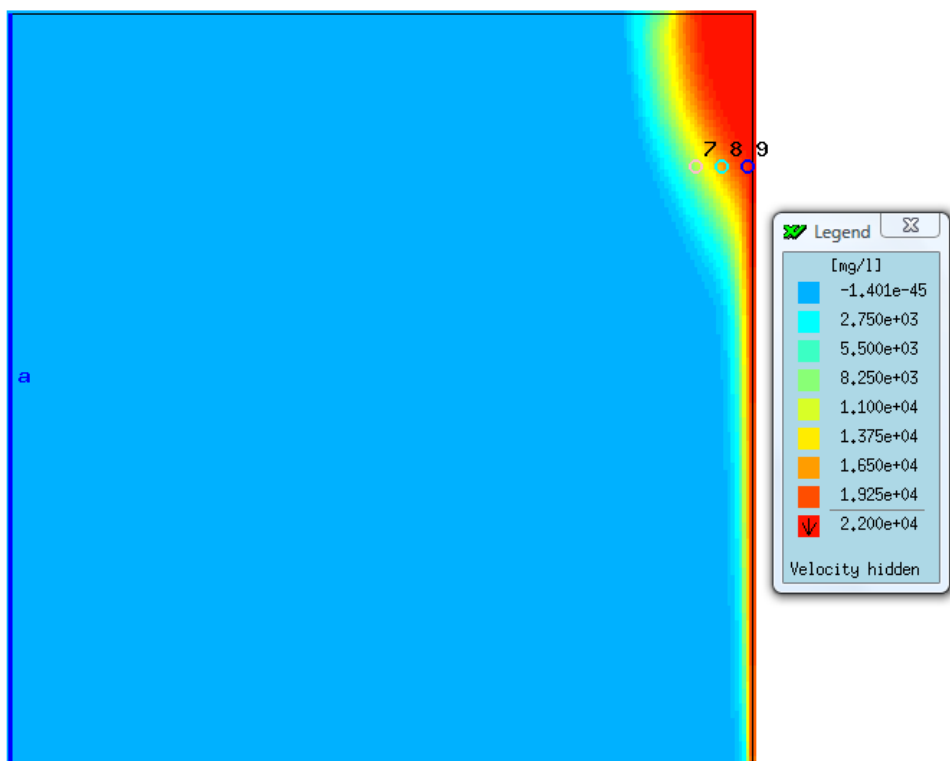
#### 8A.4.2.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.4.2.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.4.2.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.4.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

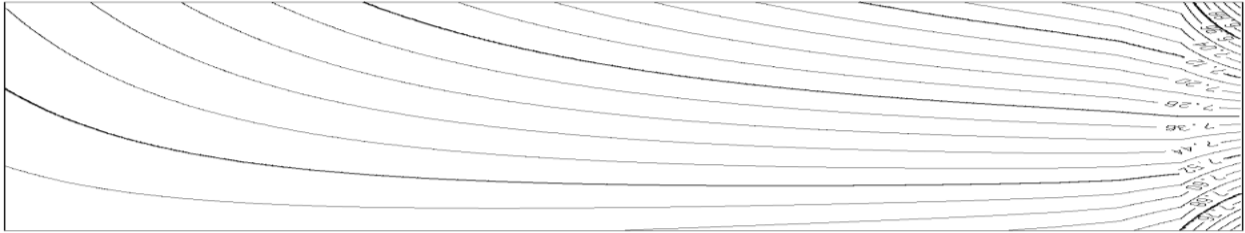
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	5.03	9.54
Στη θέση 7	3.51	7.39
Στη θέση 8	1.59	2.25

### 8A.4.3. $m_x=0.07$ & $m_y=0.07$

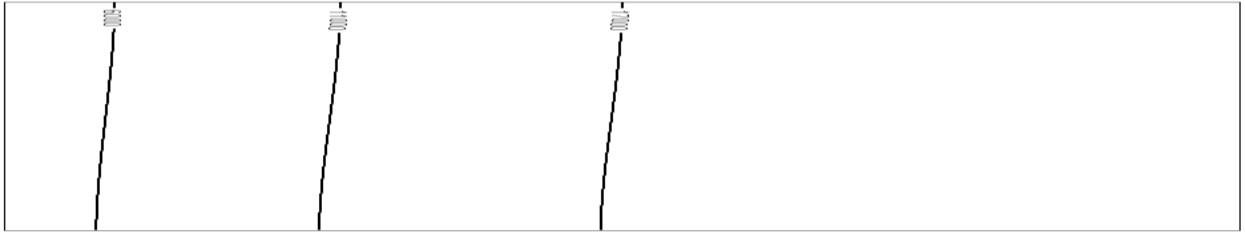
#### 8A.4.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped – <math>m_x=0.07</math> , <math>m_y=0.07</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.07
Κλίση $m_y$	0.07
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xh$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yh$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.029$ , $N_y=1.029$

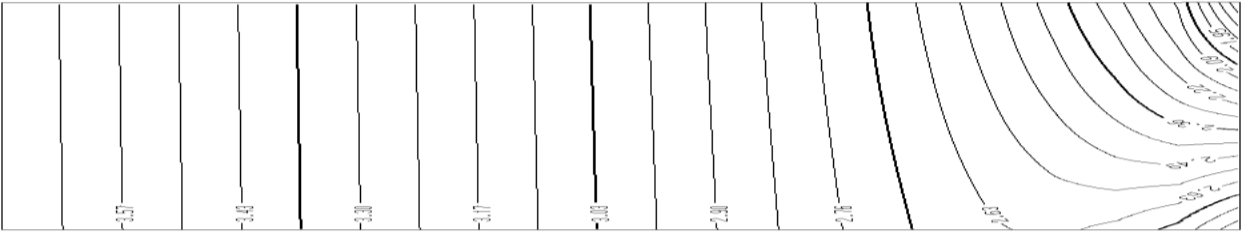
#### 8Α.4.3.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



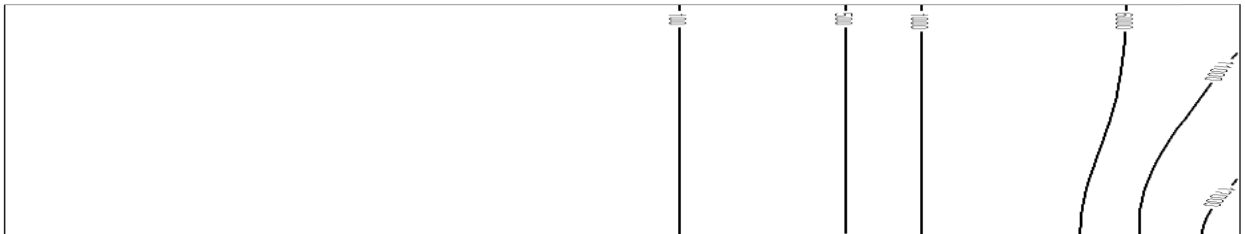
#### 8Α.4.3.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



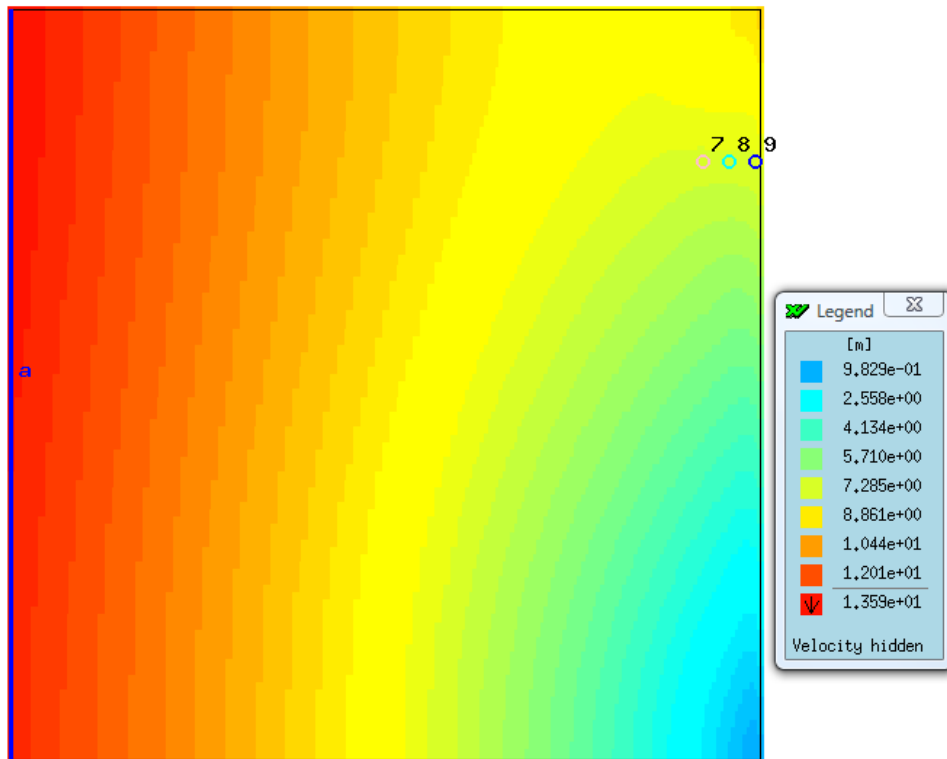
#### 8Α.4.3.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



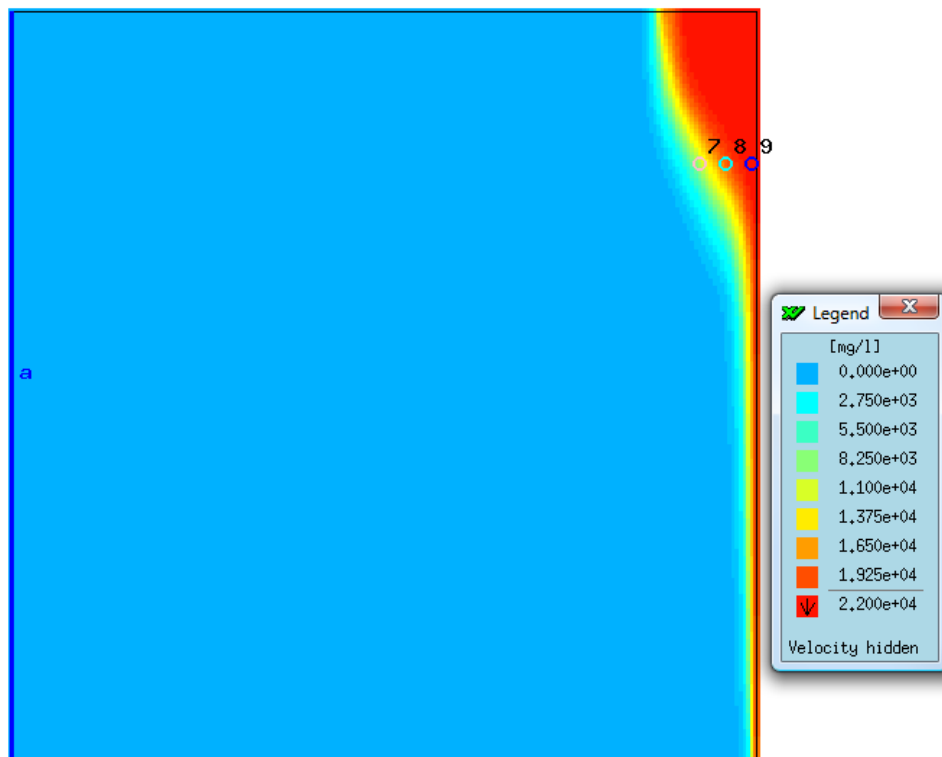
#### 8Α.4.3.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.4.3.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.4.3.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8Α.4.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.13	10.6
Στη θέση 7	3.62	7.46
Στη θέση 8	2.58	3.28

#### 8A.4.4. $m_x=0.1$ & $m_y=0.1$

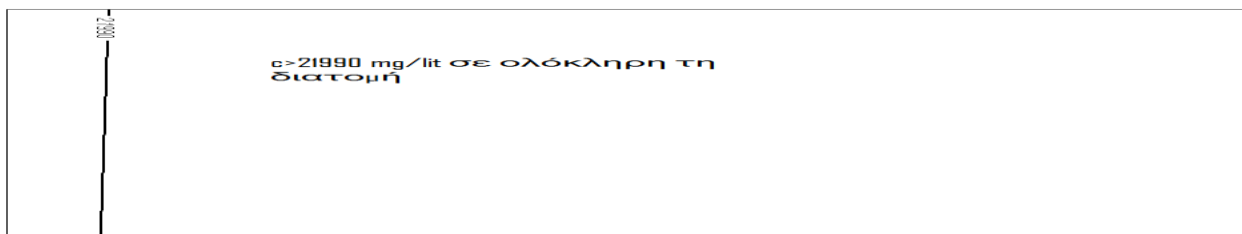
##### 8A.4.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped – <math>m_x=0.1</math> , <math>m_y=0.1</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 m
Κλίση $m_x$	0.1
Κλίση $m_y$	0.1
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xn$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yn$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.47$ , $N_y=1.47$

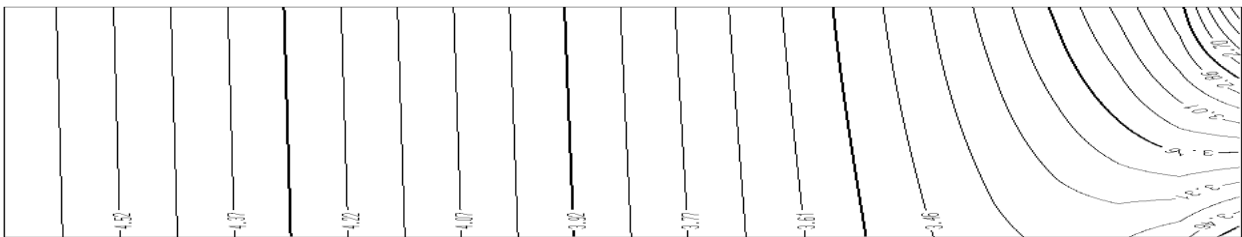
#### 8Α.4.4.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



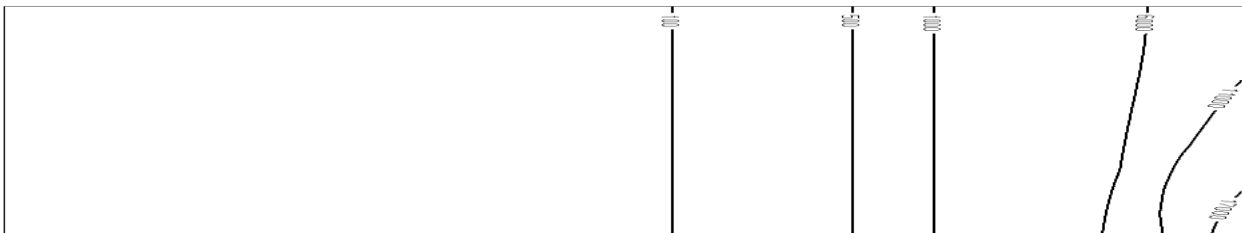
#### 8Α.4.4.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



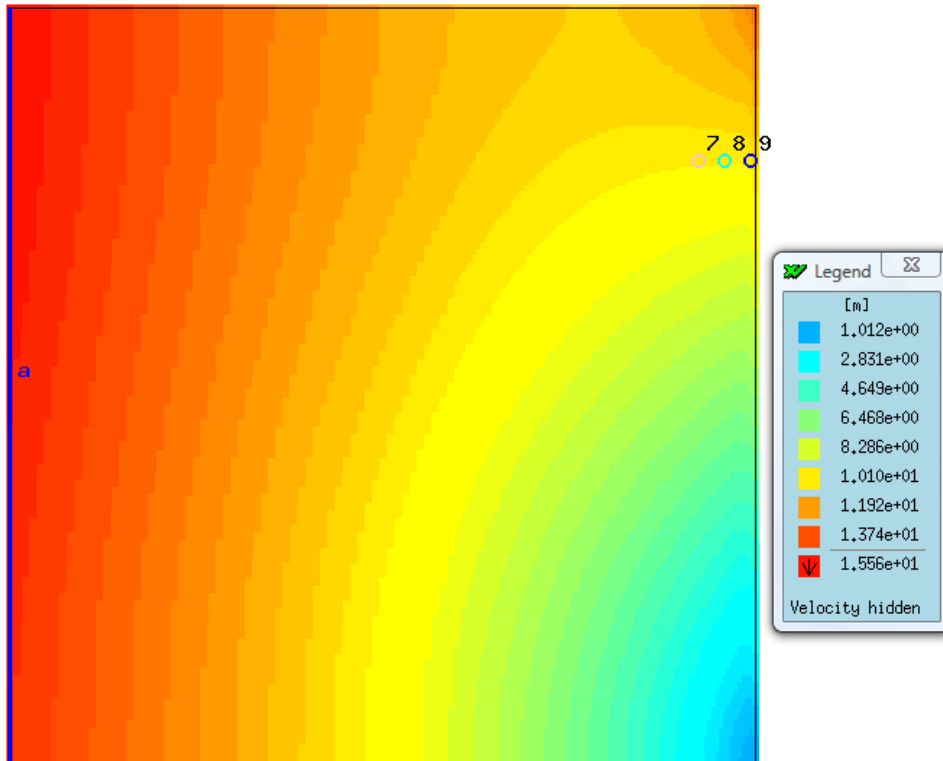
#### 8Α.4.4.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



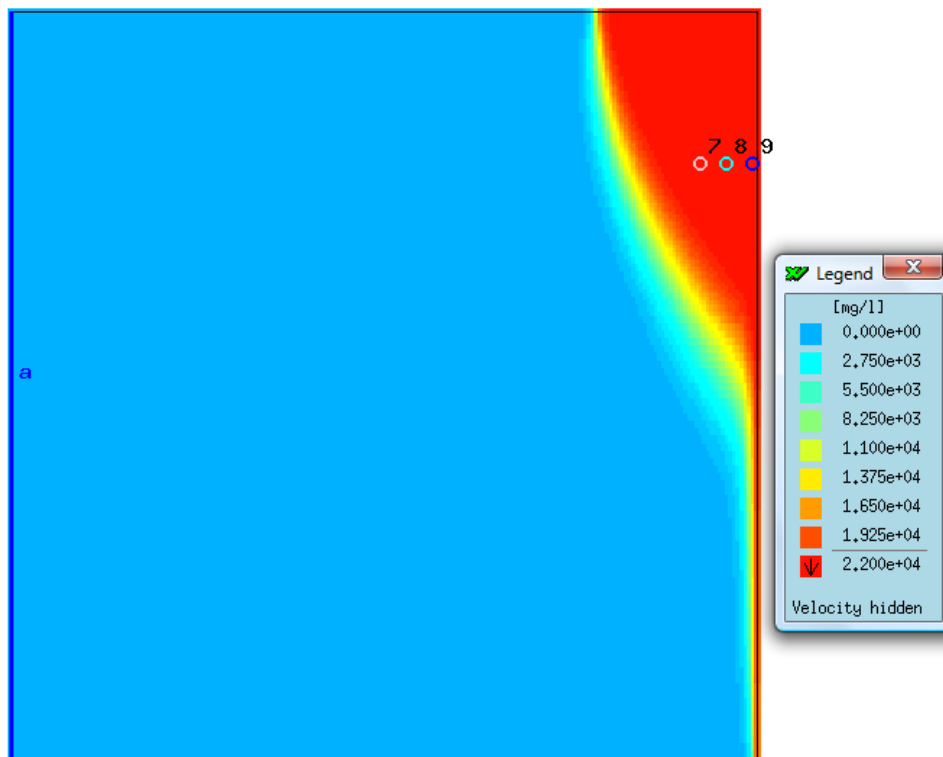
#### 8Α.4.4.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8A.4.4.6.Slice10 – Ισοδυναμικές



#### 8A.4.4.7.Slice10 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8Α.4.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	9.7	14.2
Στη θέση 7	3.5	8.1
Στη θέση 8	6.2	6.2

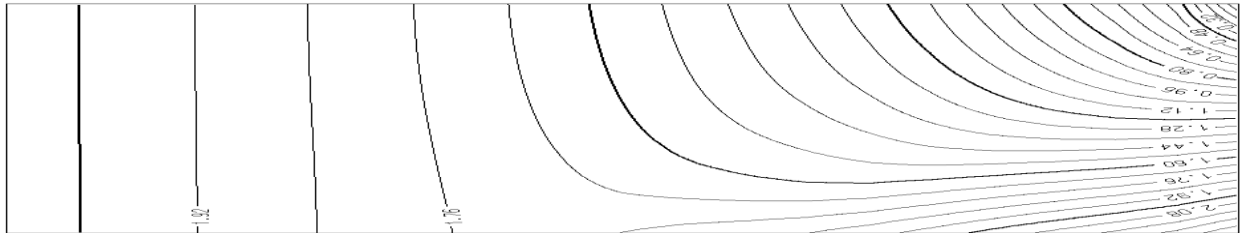
## 8B. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου ύψους (πάχους)

8B.1.Οριζόντιος (horizontal) (παρατίθενται ,καταχρηστικά, τα αποτελέσματα για οριζόντιο υδροφόρεα σταθερού ύψους  $b=100\text{m}$ )

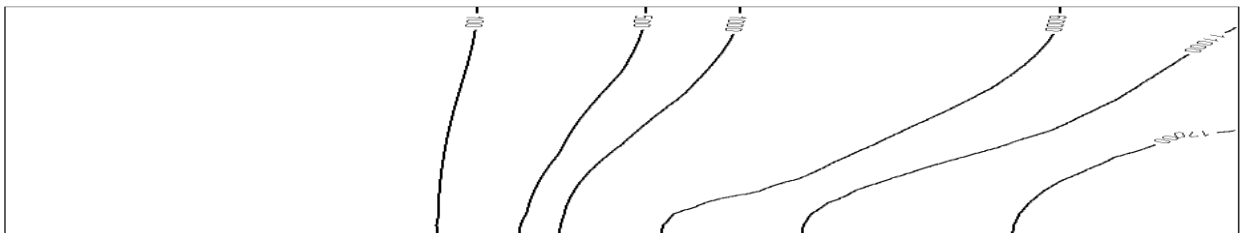
### 8B.1.1.Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

horizontal - basic model	
Παράμετροι	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ m/sec}$
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000 \text{ kg/lit}$
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024 \text{ kg/lit}$
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
Χαρακτηριστικά προβλήματος	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{ya}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0$

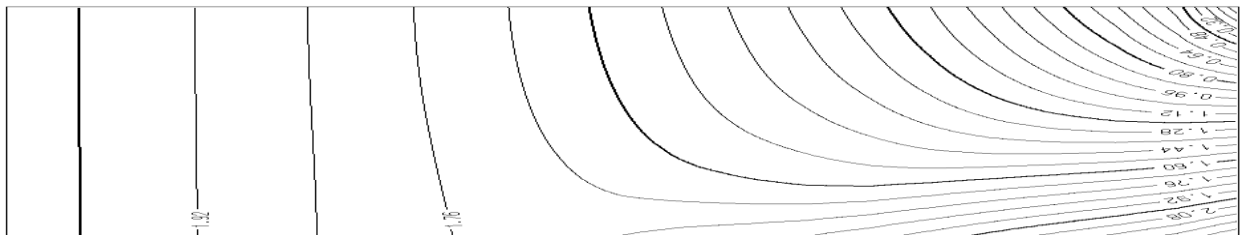
**8B.1.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές**



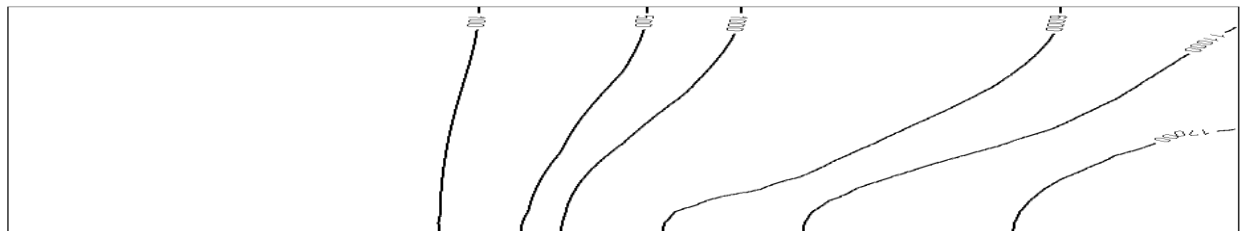
**8B.1.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



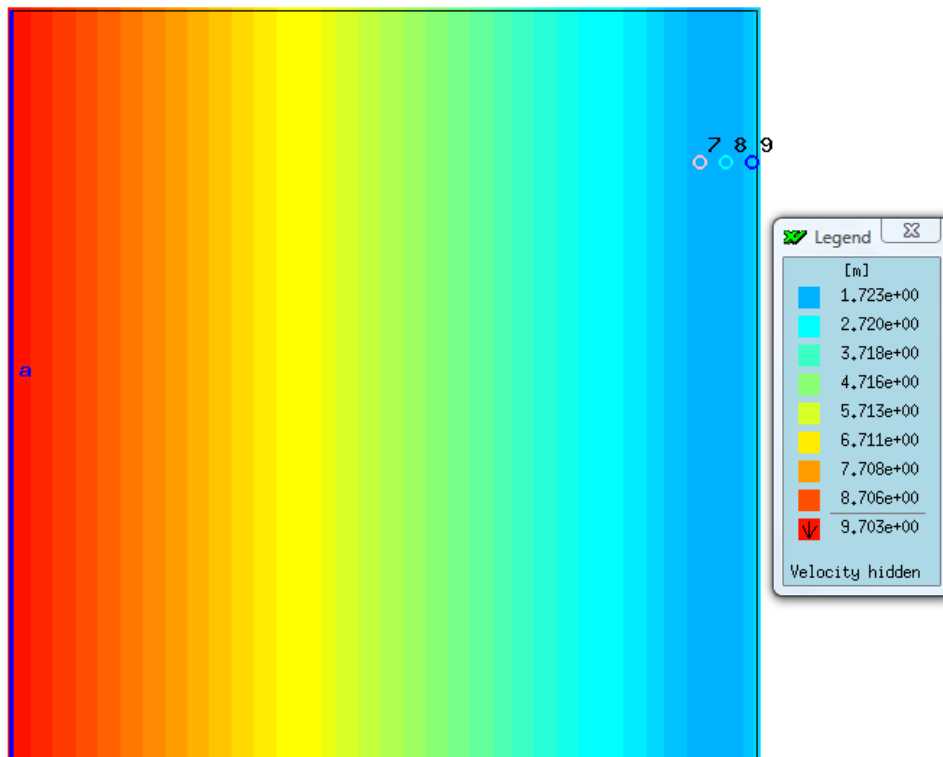
**8B.1.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές**



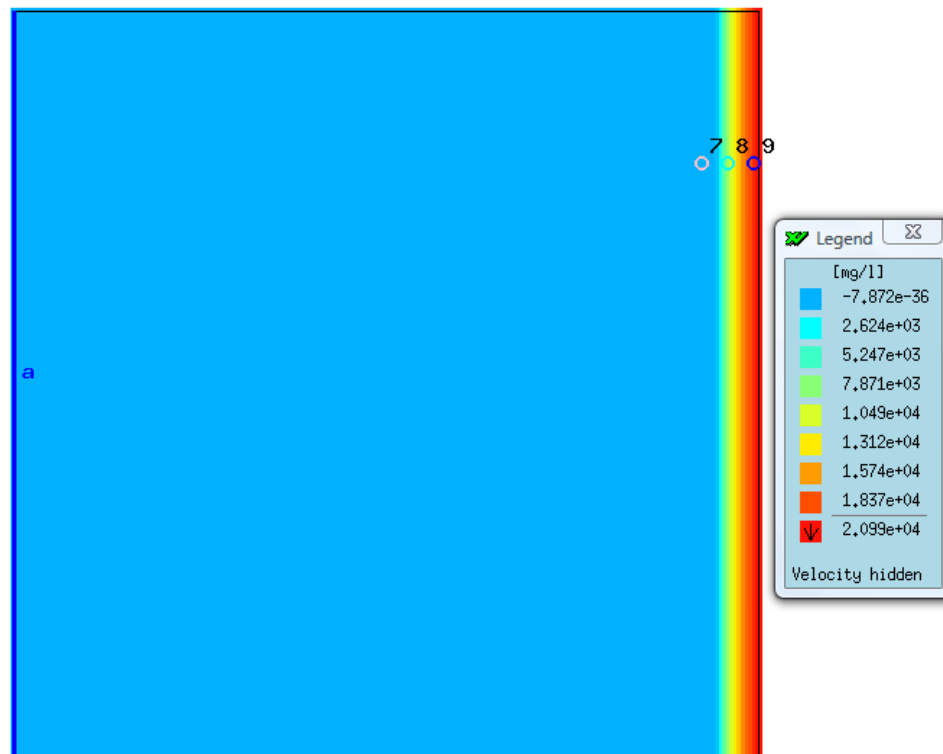
**8B.1.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



### 8B.1.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



### 8B.1.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	11.88	20.88
Στη θέση 7	6	10.5
Στη θέση 8	6	10.5

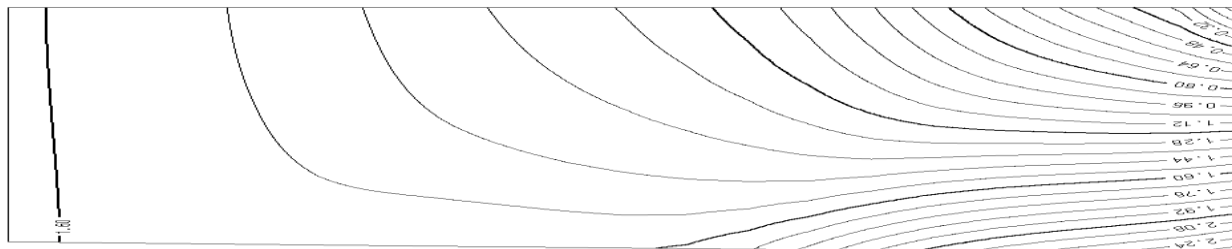
## 8B.2. Υδροφορείς με κλίση $m_x$ κάθετη προς το σύνορο- θάλασσα (seawards sloping)

### 8B.2.1. $m_x = 0.01$

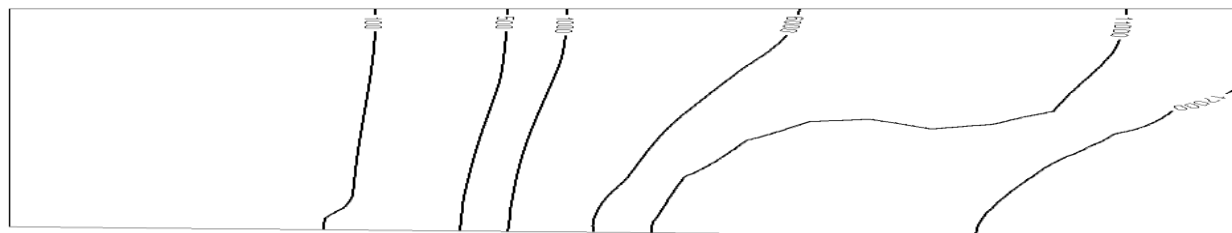
#### 8B.2.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping , <math>m_x=0.01</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.1
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.147$ , $N_y=0$

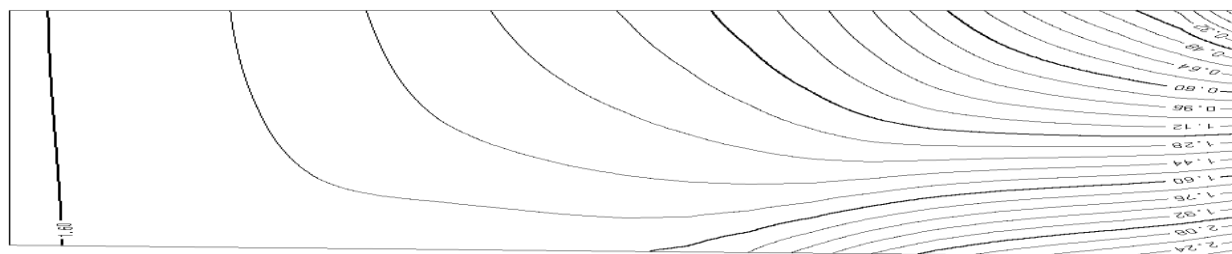
#### 8B.2.1.2 Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



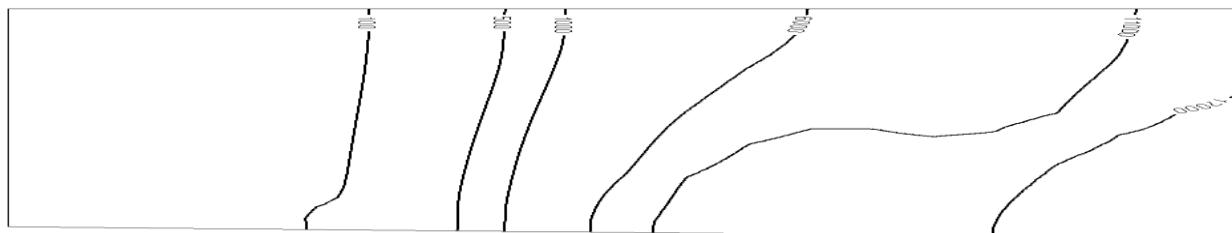
#### 8B.2.1.3 Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



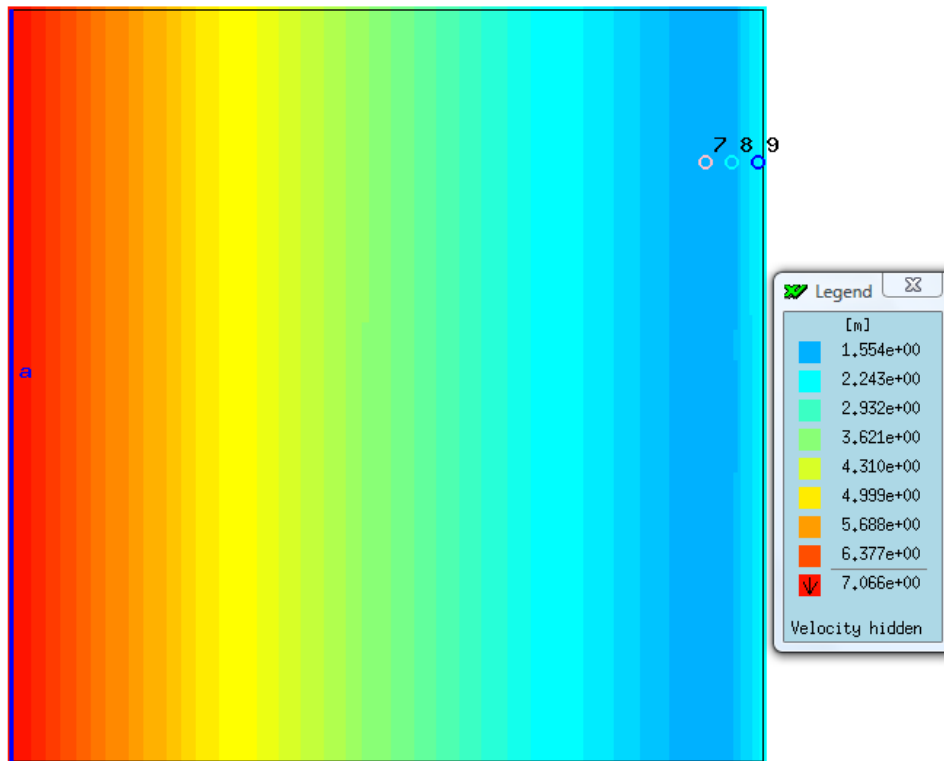
#### 8B.2.1.4 Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



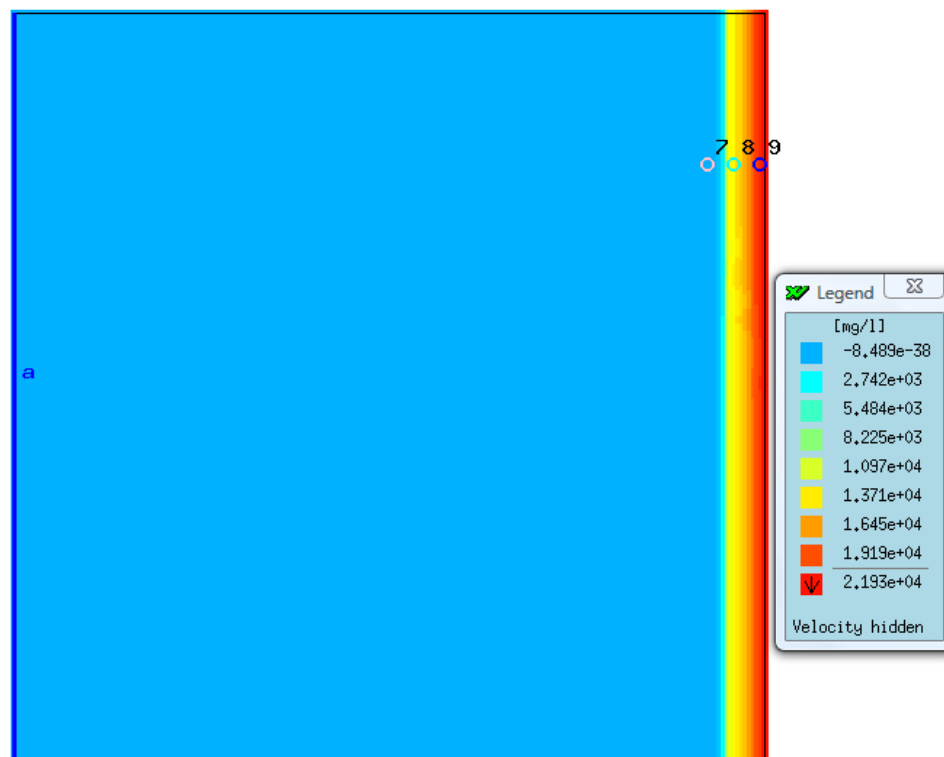
#### 8B.2.1.5 Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.2.1.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.2.1.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.2.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

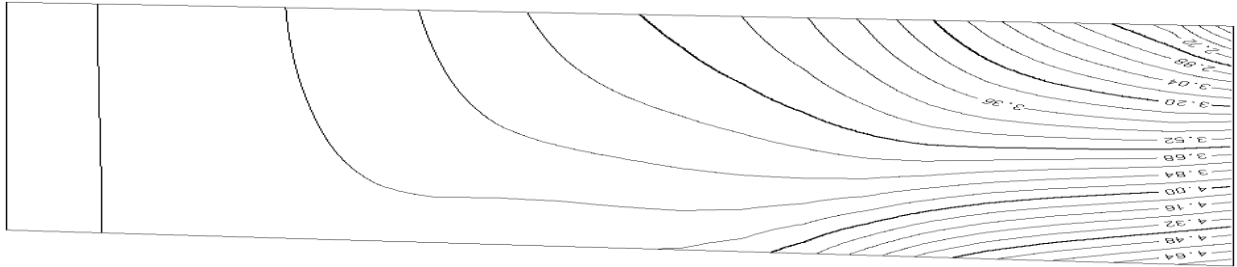
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	9.64	14.13
Στη θέση 7	4.85	7.12
Στη θέση 8	4.9	7.16

### 8B.2.2. $m_x = 0.03$

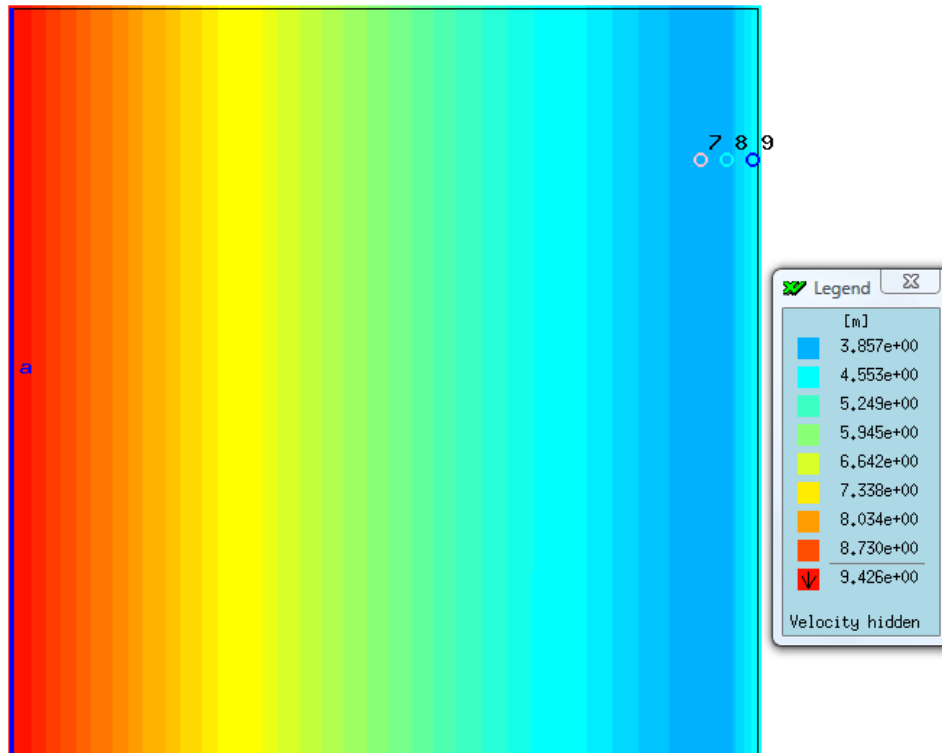
#### 8B.2.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping , <math>m_x=0.03</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.03
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xn$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_y n$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.441$ , $N_y=0$

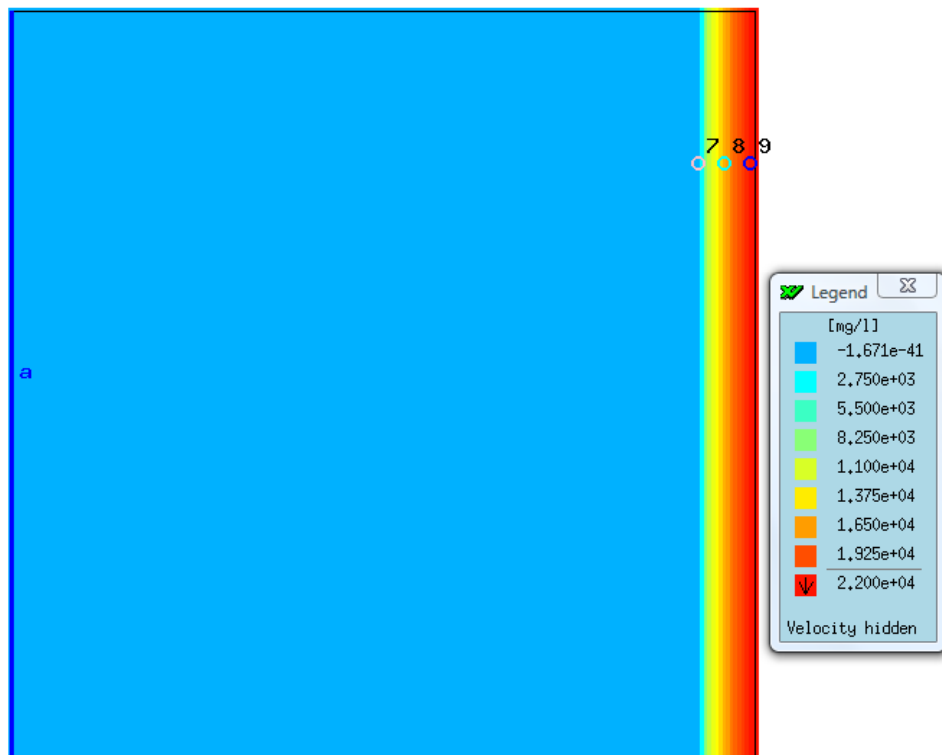
#### 8B.2.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



#### 8B.2.2.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.2.2.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.2.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

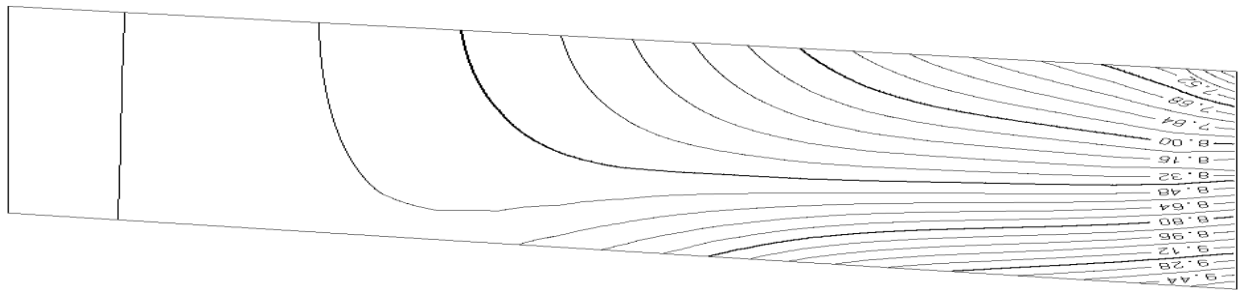
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	13.30	17.81
Στη θέση 7	7.25	9.53
Στη θέση 8	6.18	8.45

### 8B.2.3. $m_x = 0.07$

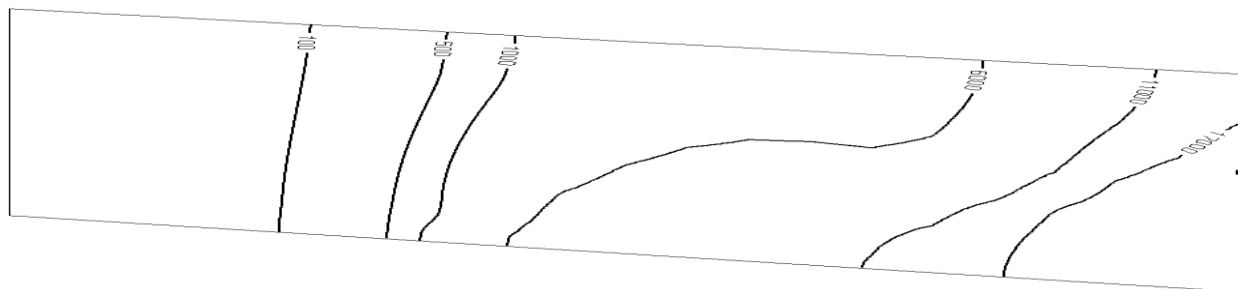
#### 8B.2.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping ,<math>m_x=0.07</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_x a/s_x n$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_x a/s_y n$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0$

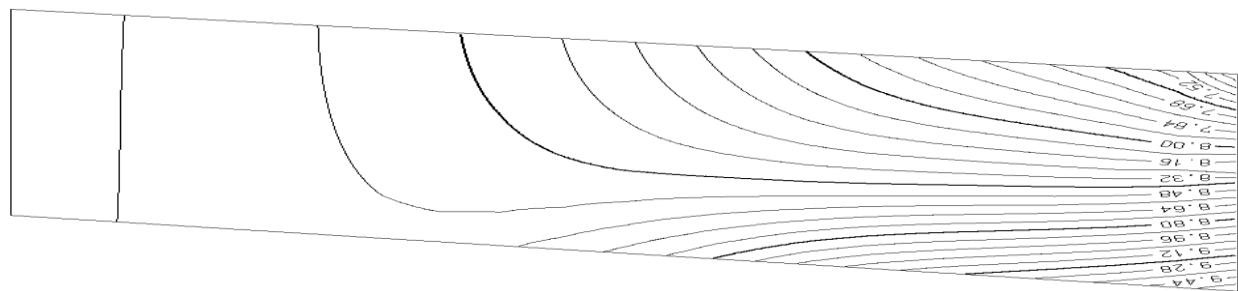
**8B.2.3.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές**



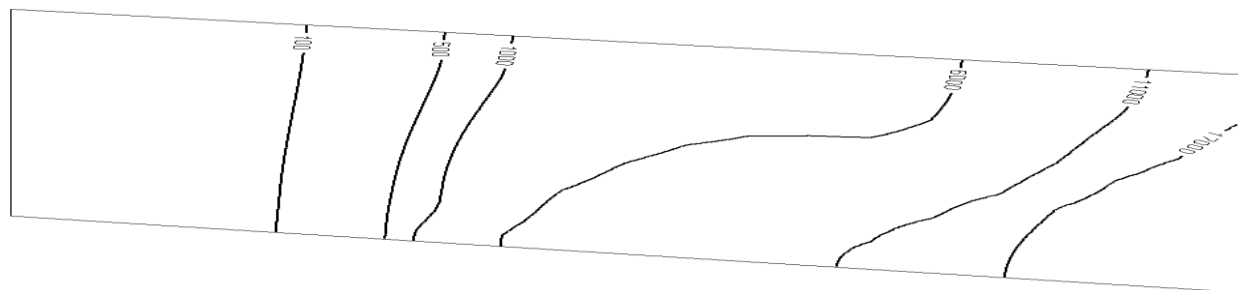
**8B.2.3.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



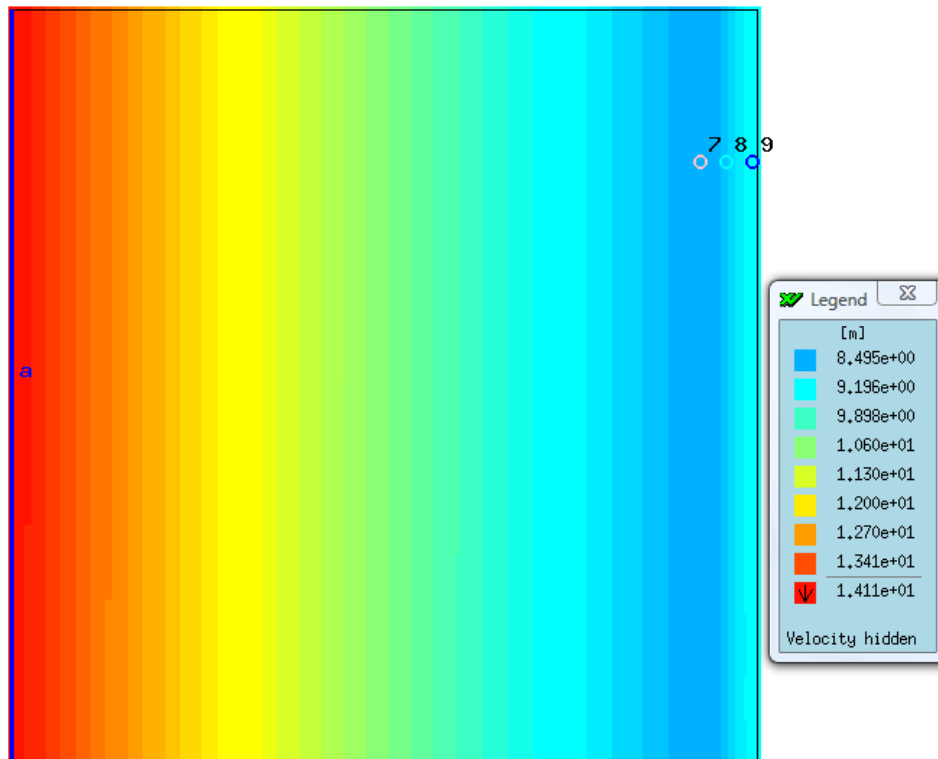
**8B.2.3.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές**



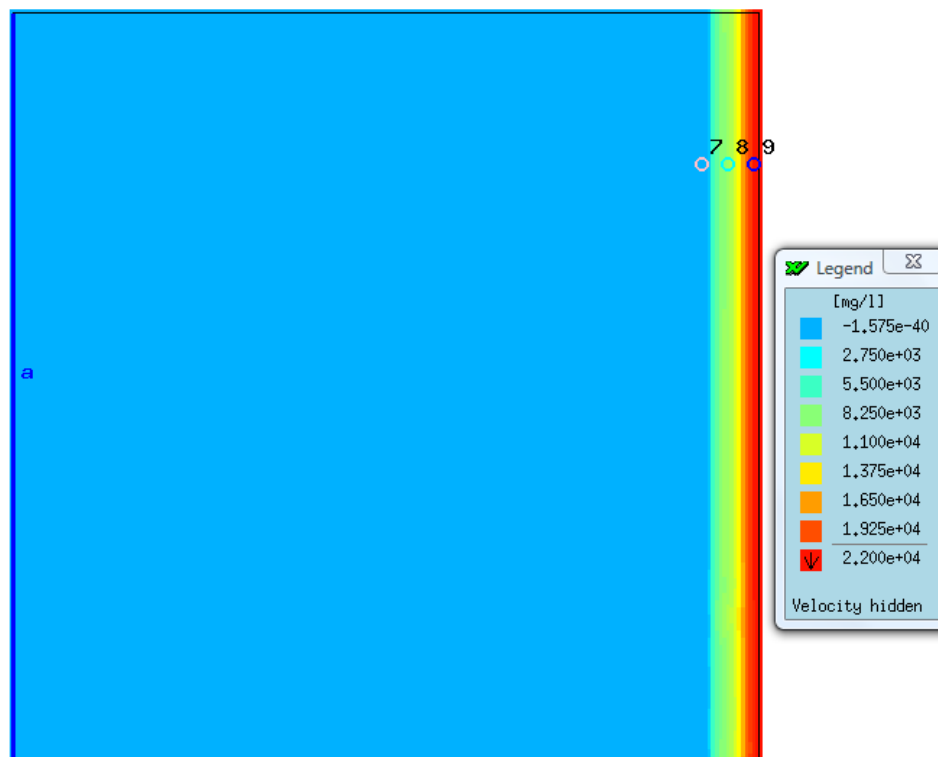
**8B.2.3.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης**



### 8B.2.3.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



### 8B.2.3.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.2.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

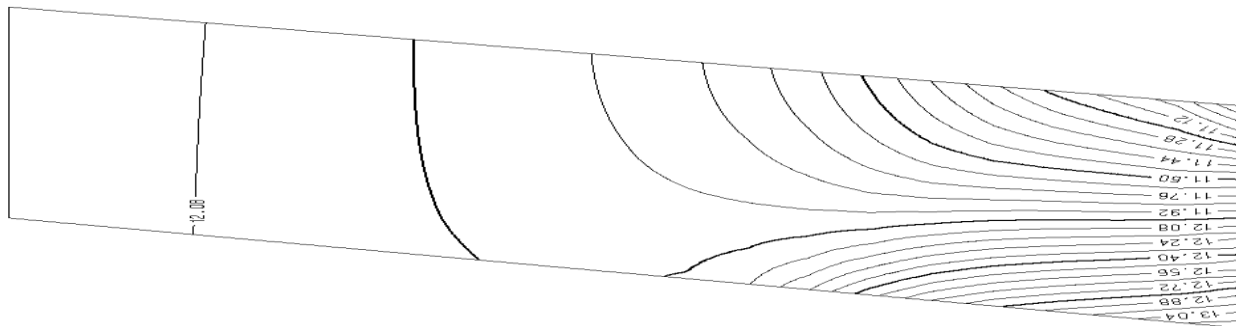
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	20.12	24.69
Στη θέση 7	9.5	11.8
Στη θέση 8	10.8	13.1

### 8B.2.4. $m_x = 0.1$

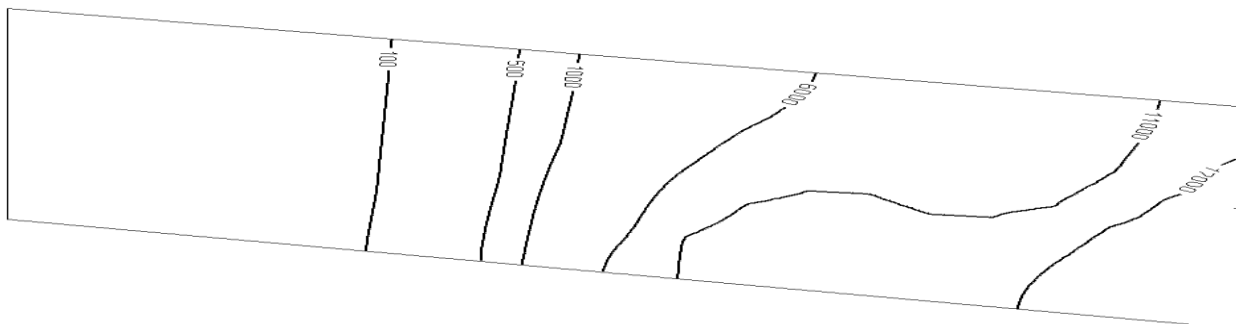
#### 8B.2.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Seawards sloping , <math>m_x=0.1</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.1
Κλίση $m_y$	0
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xh$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yh$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x = 1.47$ , $N_y = 0$

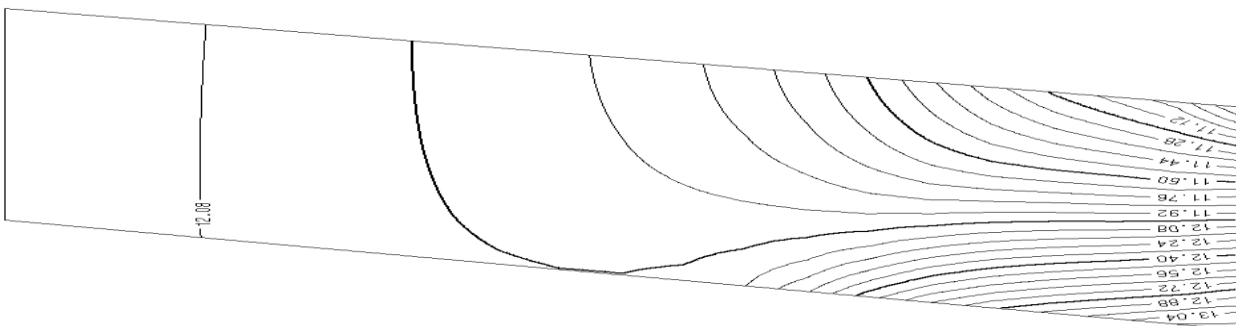
#### 8B.2.4.2 Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



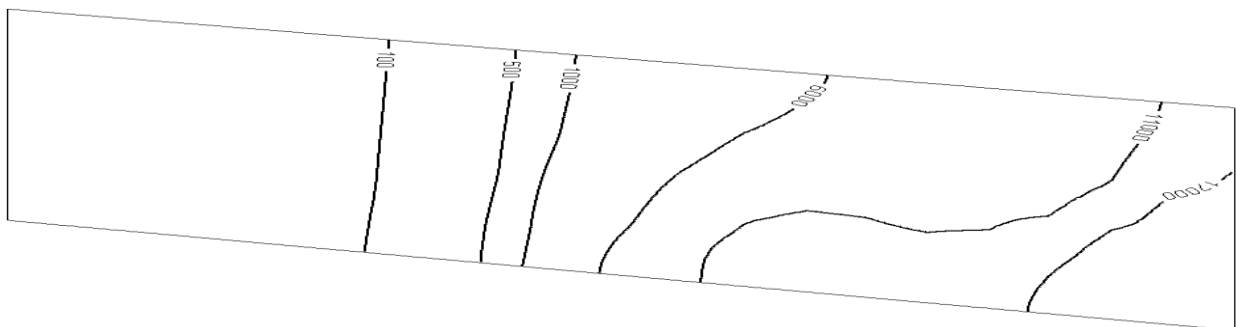
#### 8B.2.4.3 Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



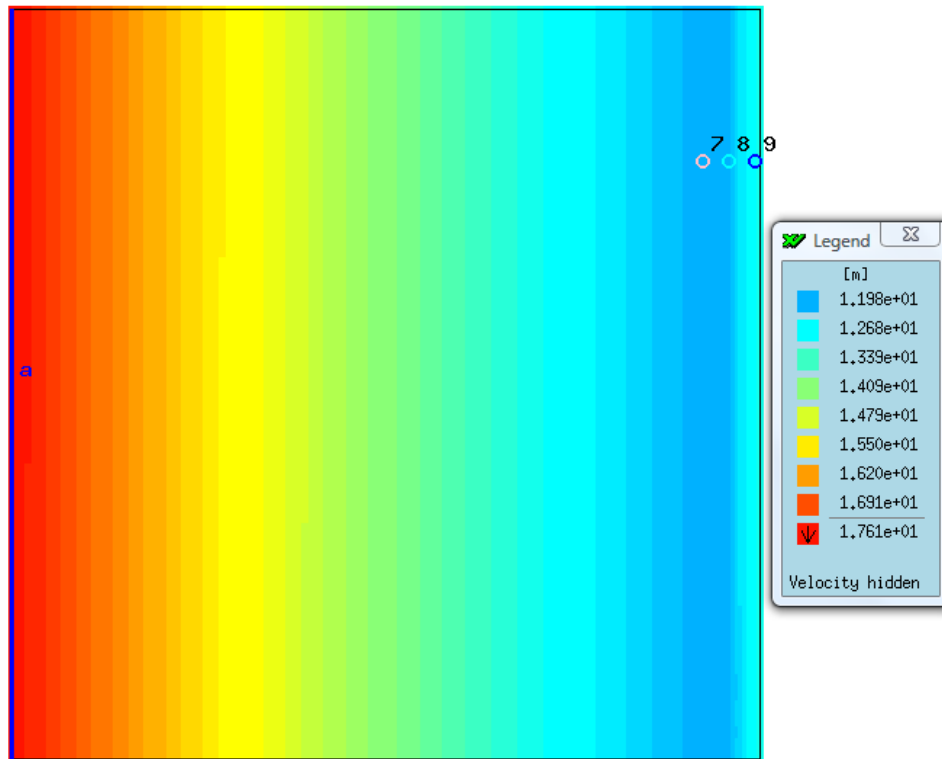
#### 8B.2.4.4 Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



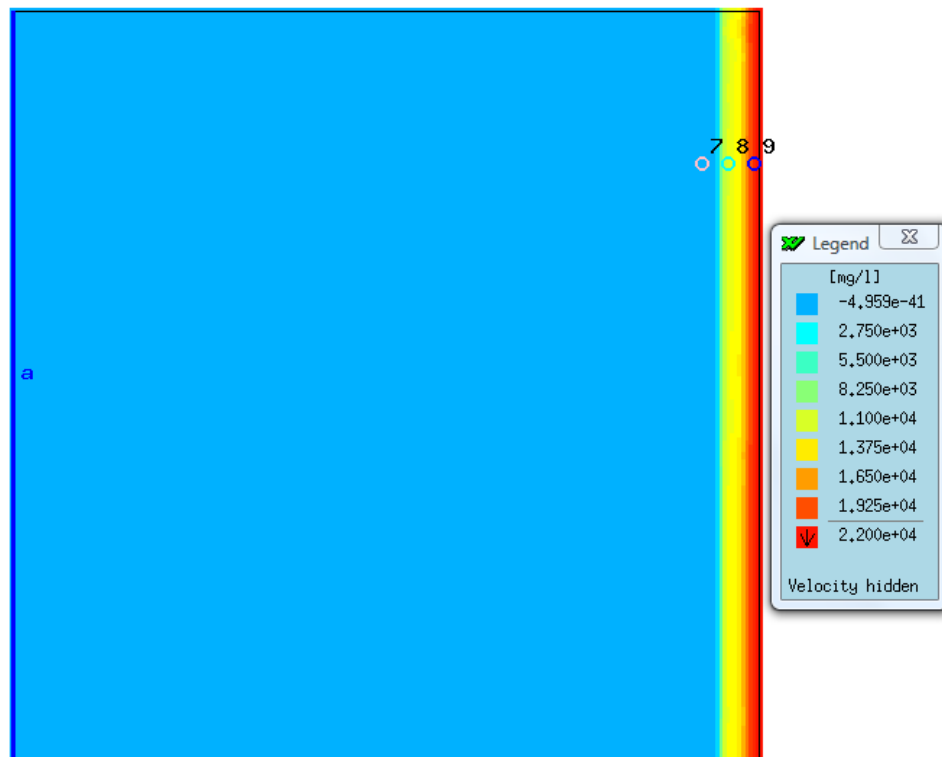
#### 8B.2.4.5 Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.2.4.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.2.4.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.2.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	28	32.6
Στη θέση 7	13.84	16.11
Στη θέση 8	14.5	16.8

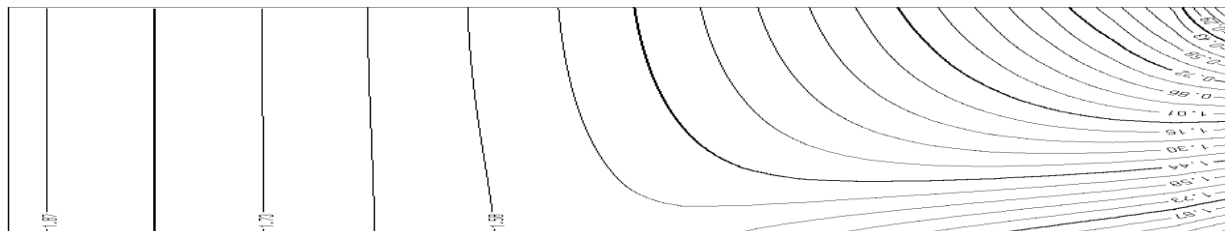
### 8B.3. Υδροφορέας με κλίση $m_y$ παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (v-shaped)

#### 8B.3.1. $m_y=0.01$

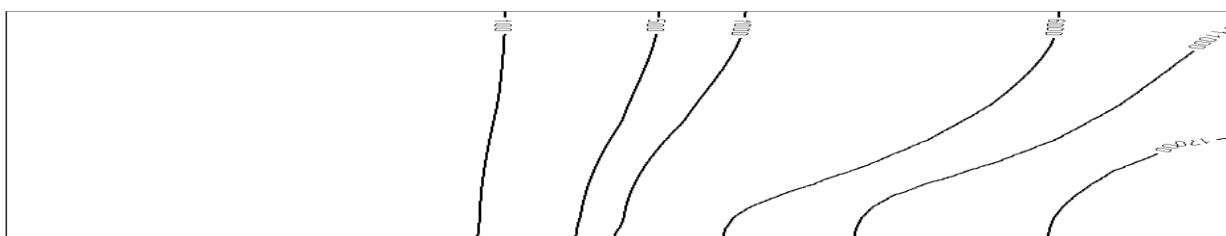
##### 8B.3.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V - shaped , <math>m_y=0.01</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.01
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0.147$

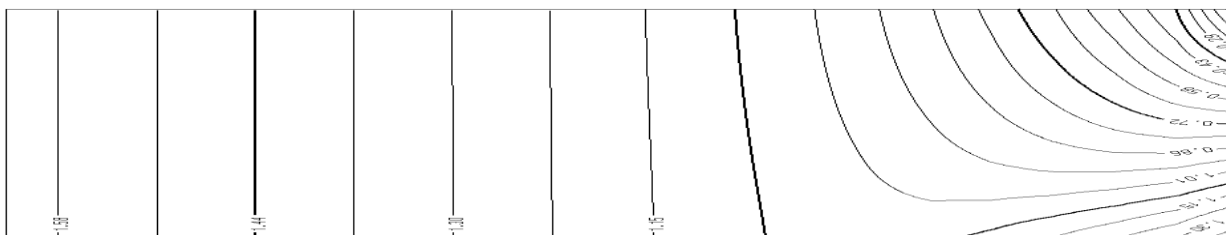
#### 8B.3.1.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



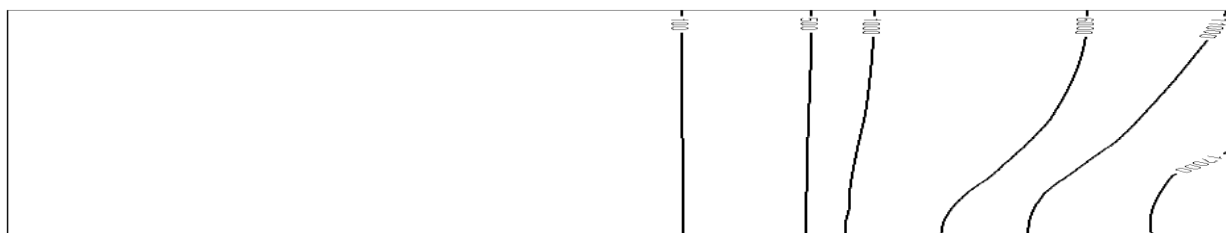
#### 8B.3.1.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



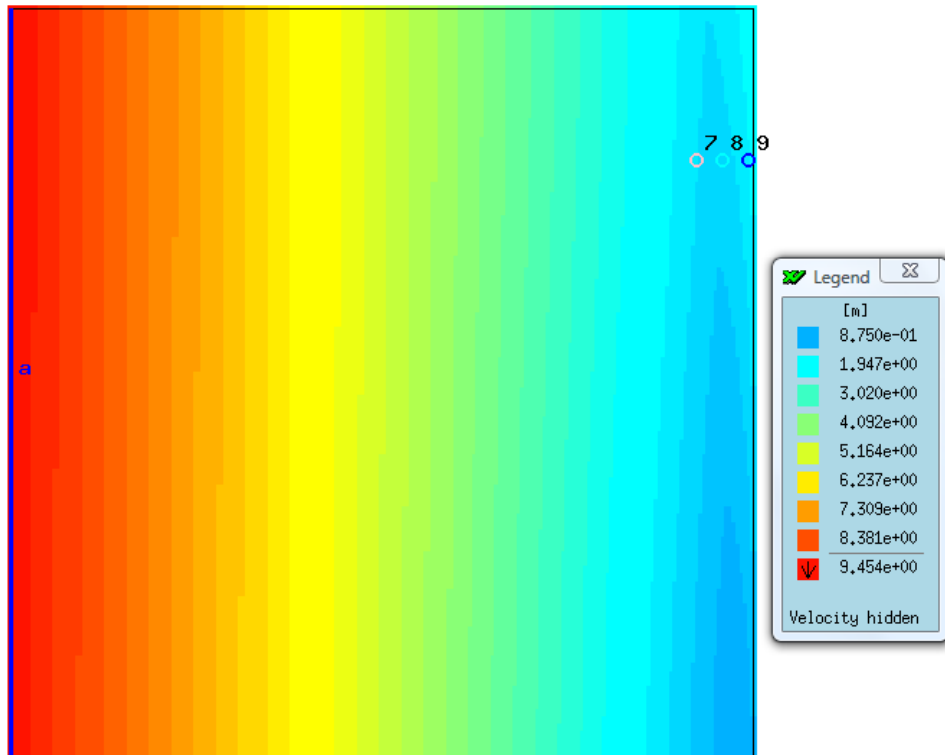
#### 8B.3.1.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



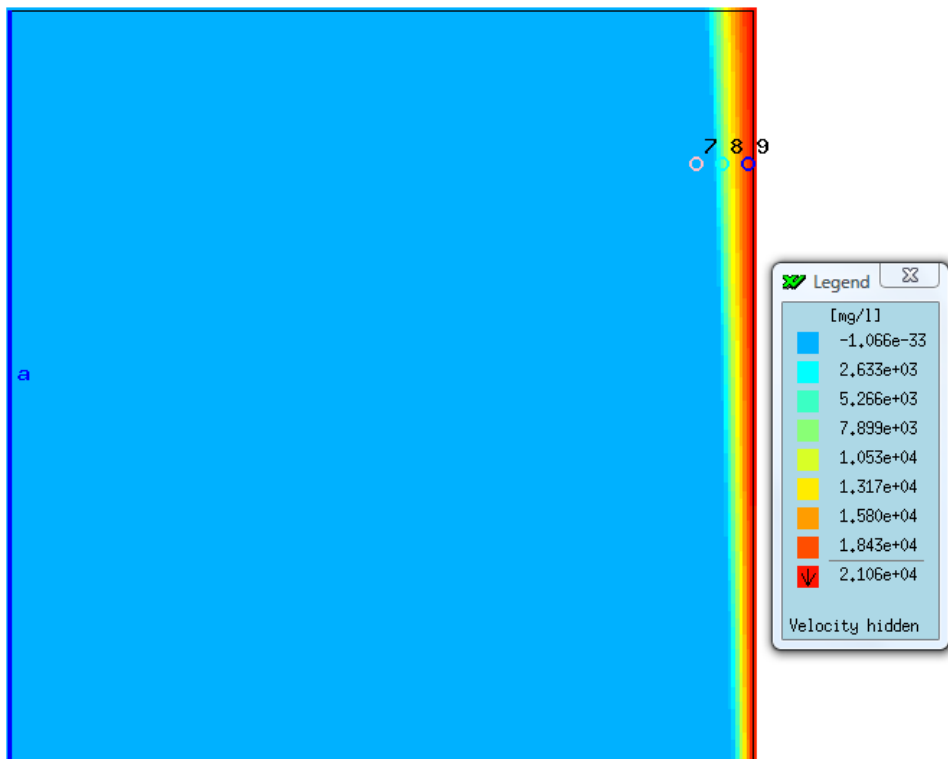
#### 8B.3.1.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



### 8B.3.1.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



### 8B.3.1.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.3.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

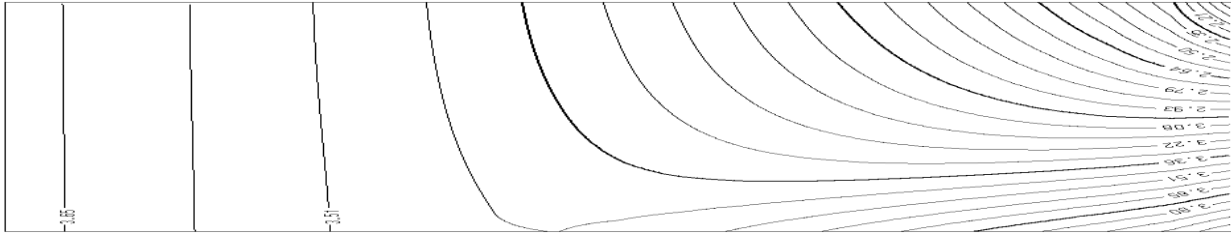
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	9.24	16
Στη θέση 7	4	7
Στη θέση 8	5.3	9.1

### 8B.3.2. $my=0.03$

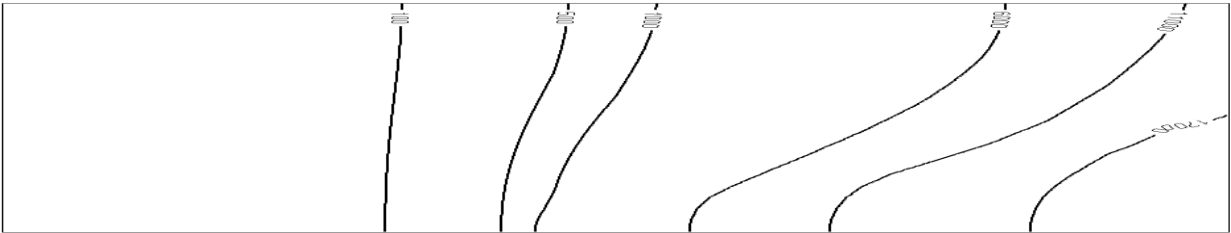
#### 8B.3.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V - shaped , <math>my=0.03</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.03
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xp}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yp}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=0.441$

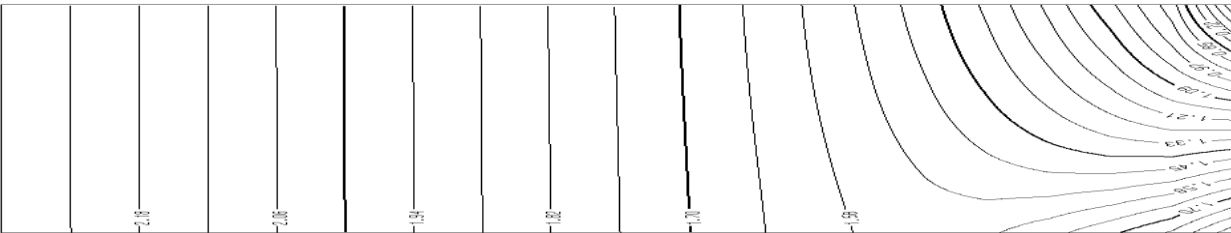
#### 8B.3.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



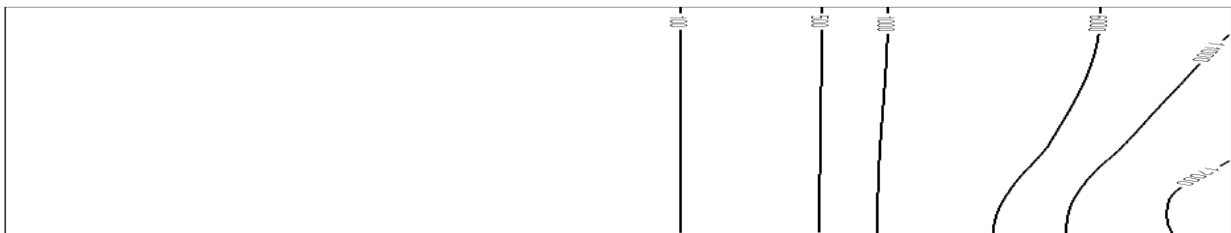
#### 8B.3.2.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



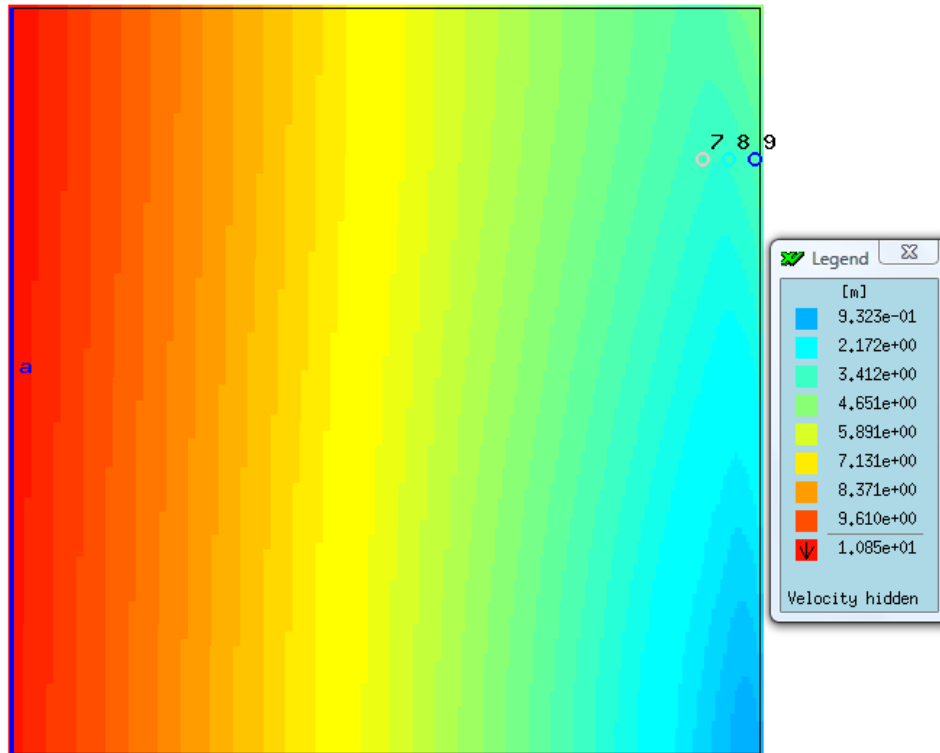
#### 8B.3.2.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



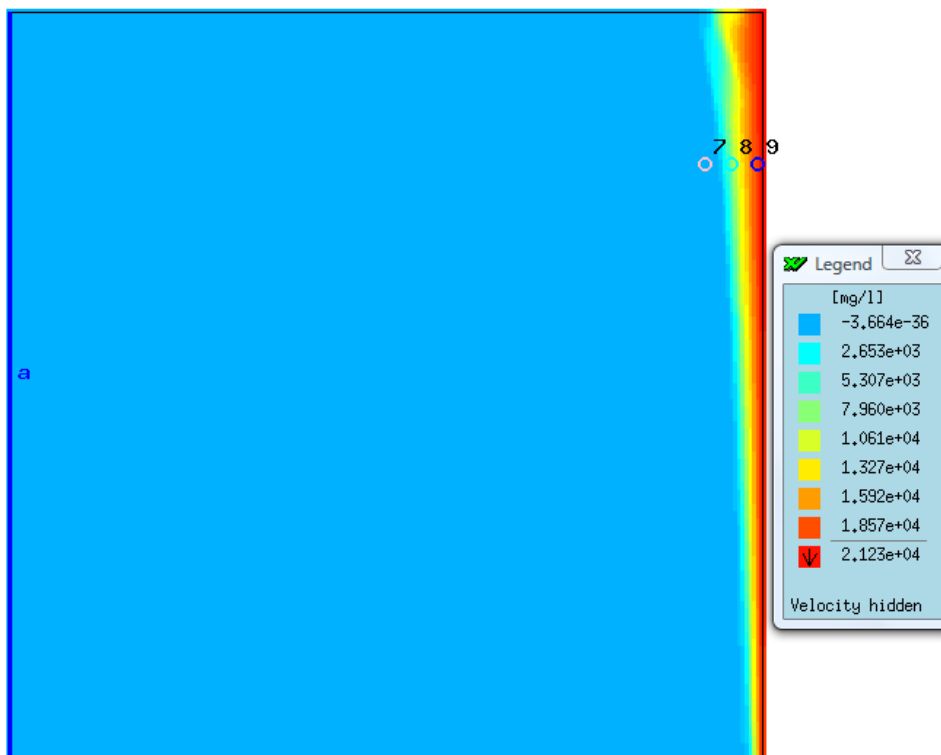
#### 8B.3.2.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



### 8B.3.2.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



### 8B.3.2.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.3.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	9.24	16
Στη θέση 7	4.22	7.9
Στη θέση 8	5.11	8.26

### 8B.3.3. $my=0.07$

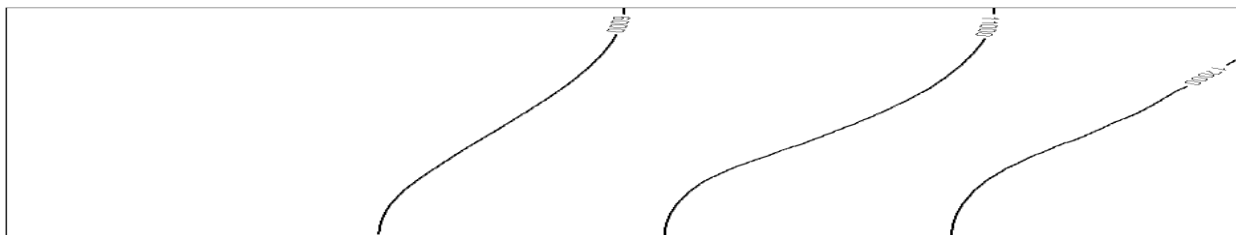
#### 8B.3.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V - shaped , <math>my=0.07</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.07
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xp}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yp}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=1.029$

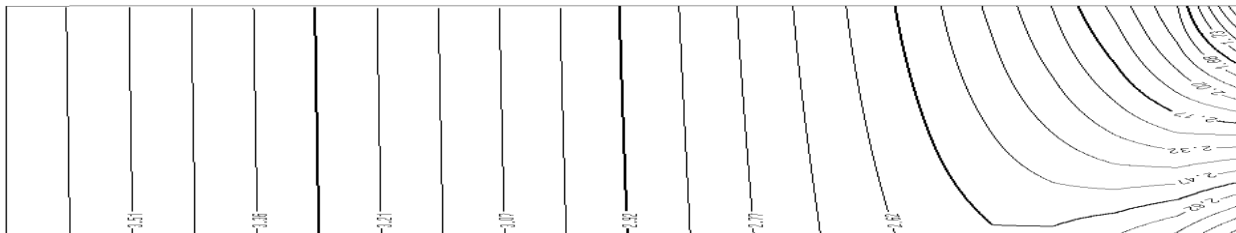
#### 8B.3.3.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



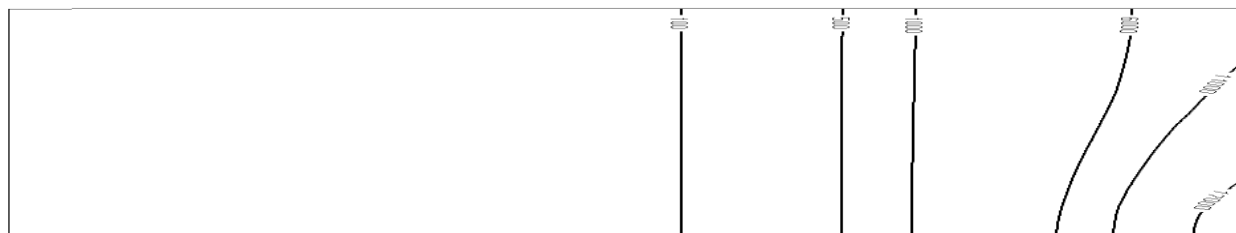
#### 8B.3.3.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



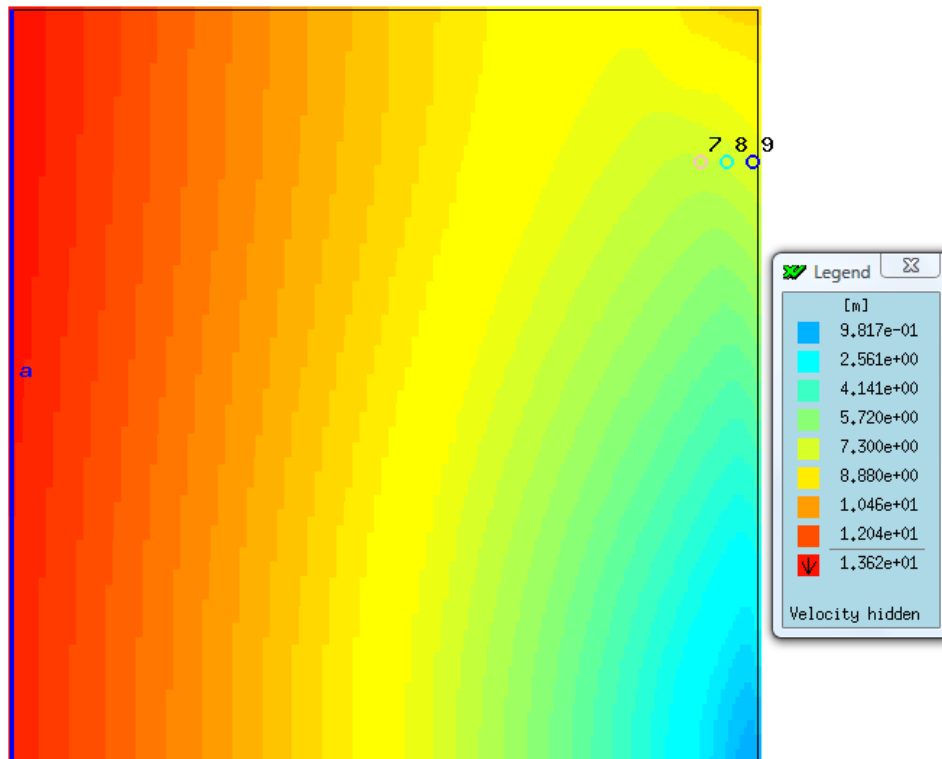
#### 8B.3.3.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



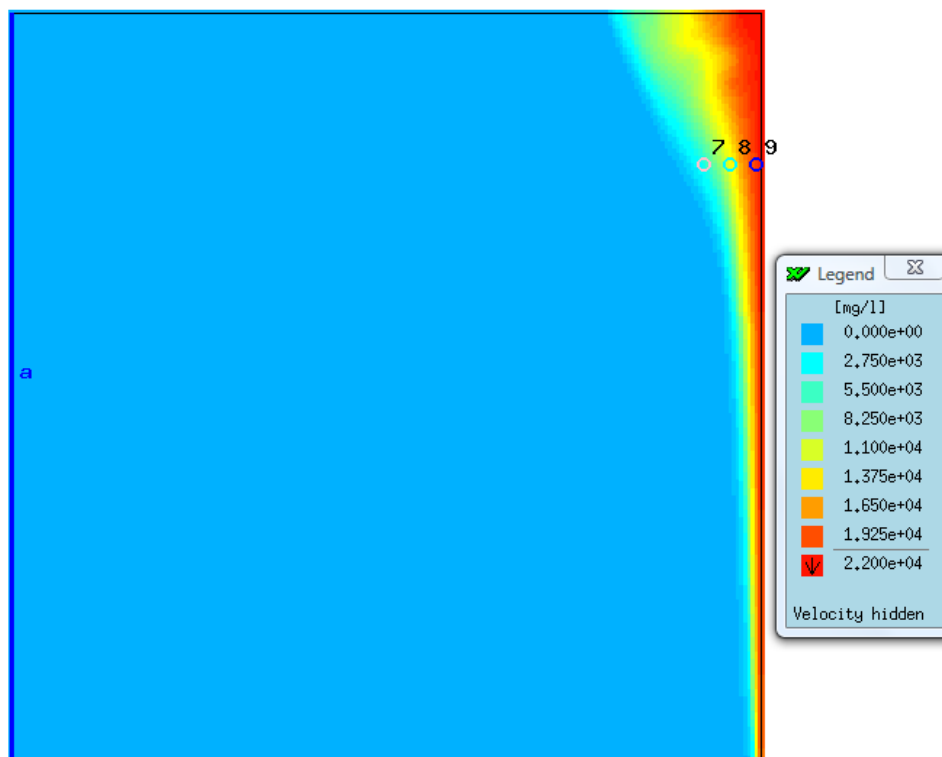
#### 8B.3.3.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



### 8B.3.3.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



### 8B.3.3.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.3.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

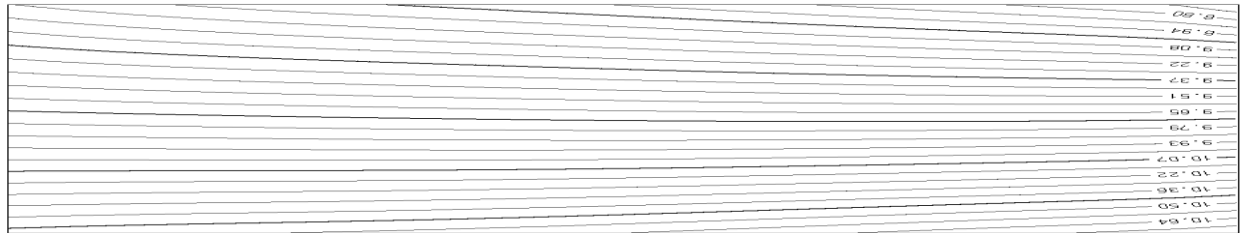
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	8.3	15
Στη θέση 7	4.5	9.5
Στη θέση 8	3.8	5.6

### 8B.3.4. $my=0.1$

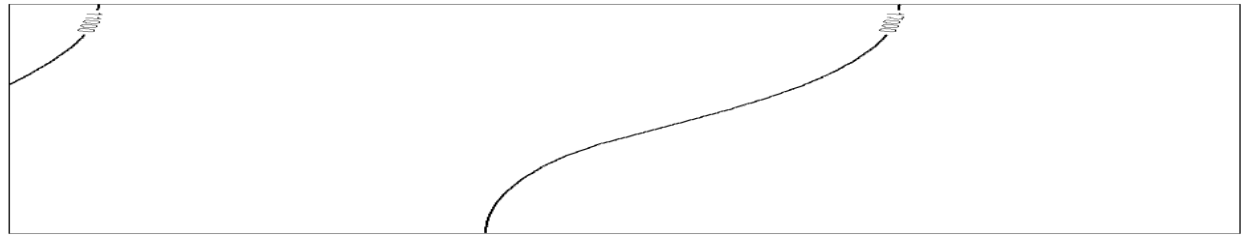
#### 8B.3.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>V - shaped , <math>my=0.1</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0
Κλίση $m_y$	0.1
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0$ , $N_y=1.47$

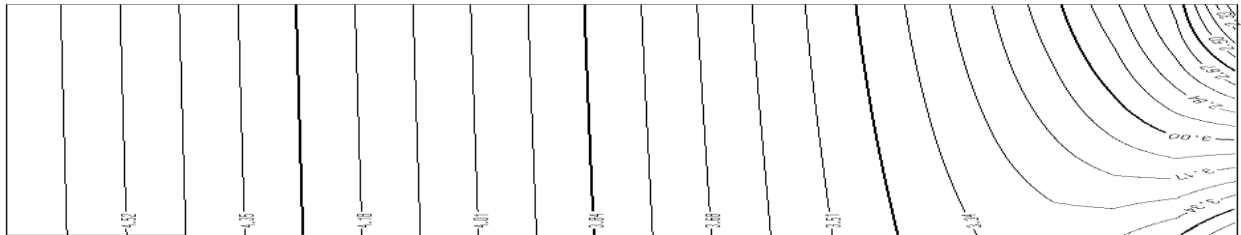
#### 8B.3.4.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



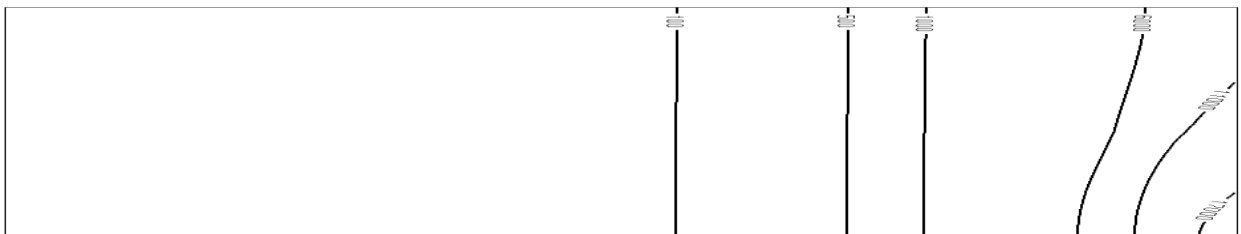
#### 8B.3.4.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



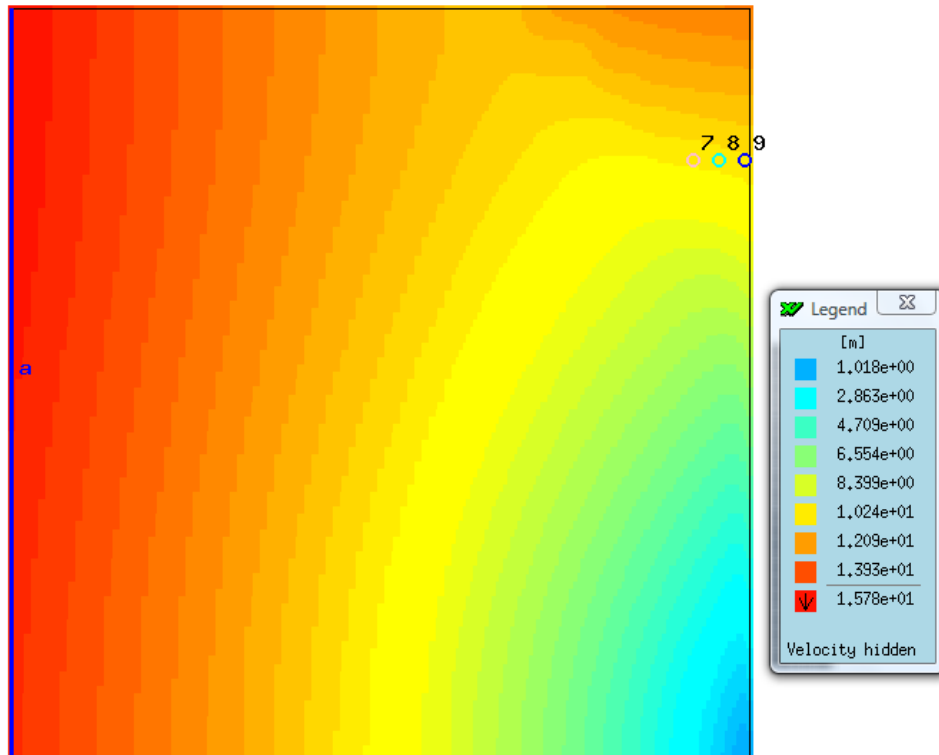
#### 8B.3.4.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



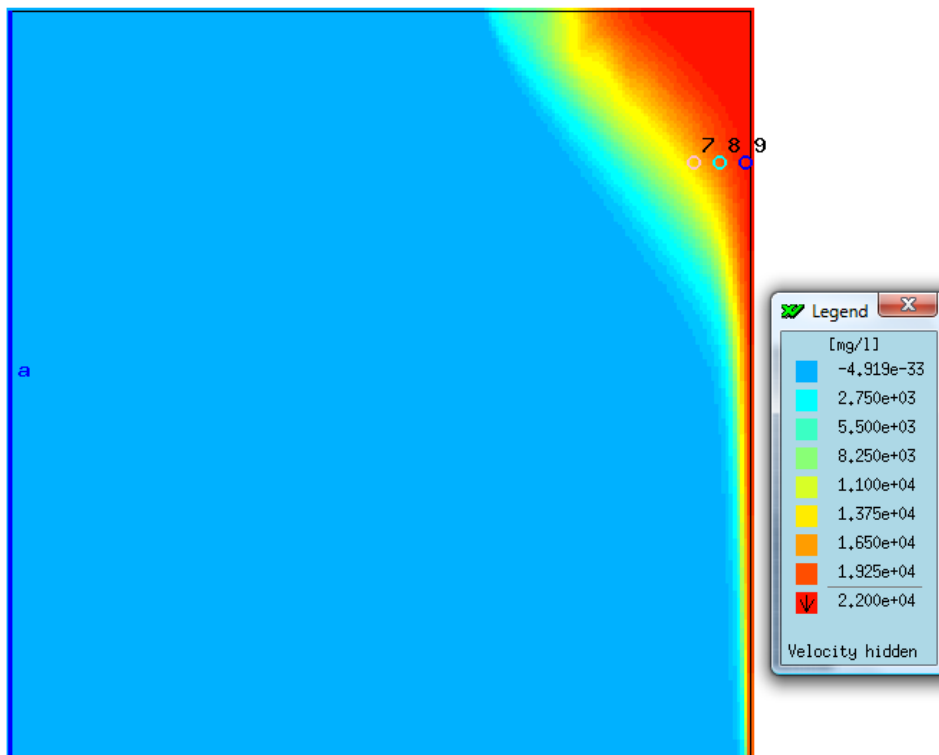
#### 8B.3.4.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.3.4.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.3.4.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.3.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	6.8	13.5
Στη θέση 7	4.5	10.4
Στη θέση 8	2.3	3.2

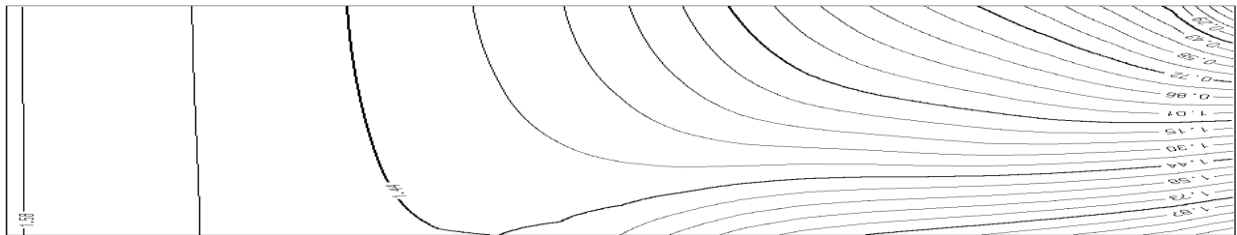
#### 8B.4. Υδροφορείς με κλίση $m_x$ κάθετη προς το σύνορο – θάλασσα & κλίση $m_y$ παράλληλη προς το σύνορο θάλασσα (warped)

##### 8B.4.1. $m_x=0.01$ & $m_y=0.01$

##### 8B.4.1.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped , <math>m_x=0.01</math> &amp; <math>m_y=0.01</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.01
Κλίση $m_y$	0.01
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{xn}$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_{xa}/s_{yn}$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.147$ , $N_y=0.147$

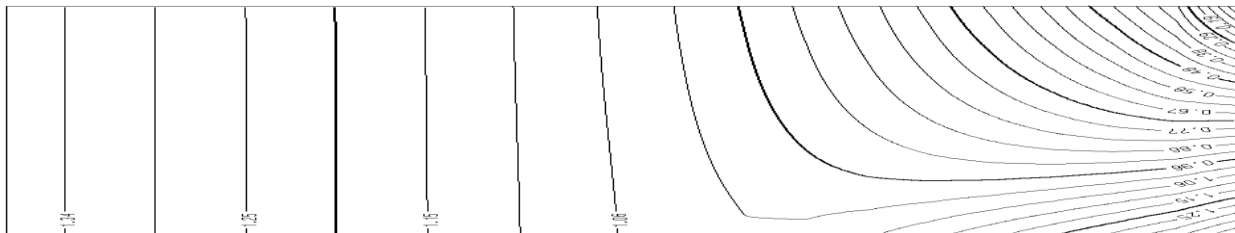
#### 8B.4.1.2.Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



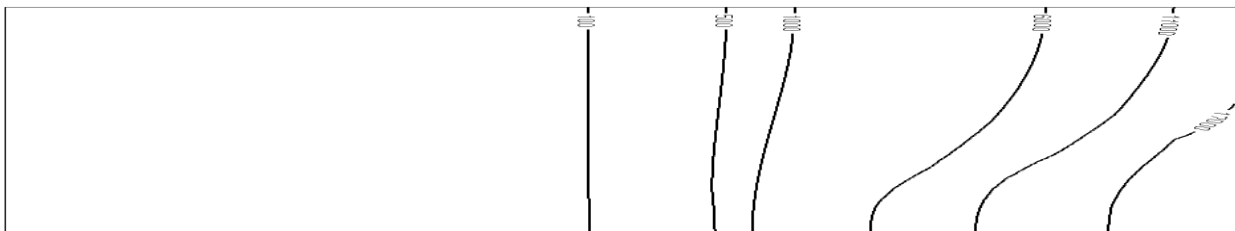
#### 8B.4.1.3.Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



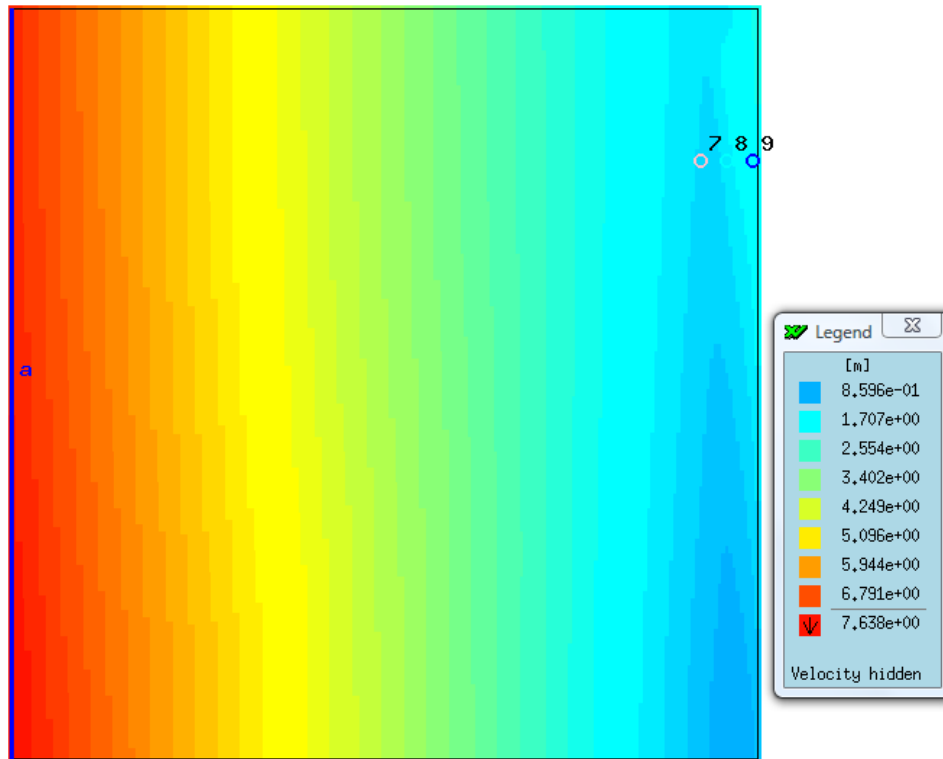
#### 8B.4.1.4.Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



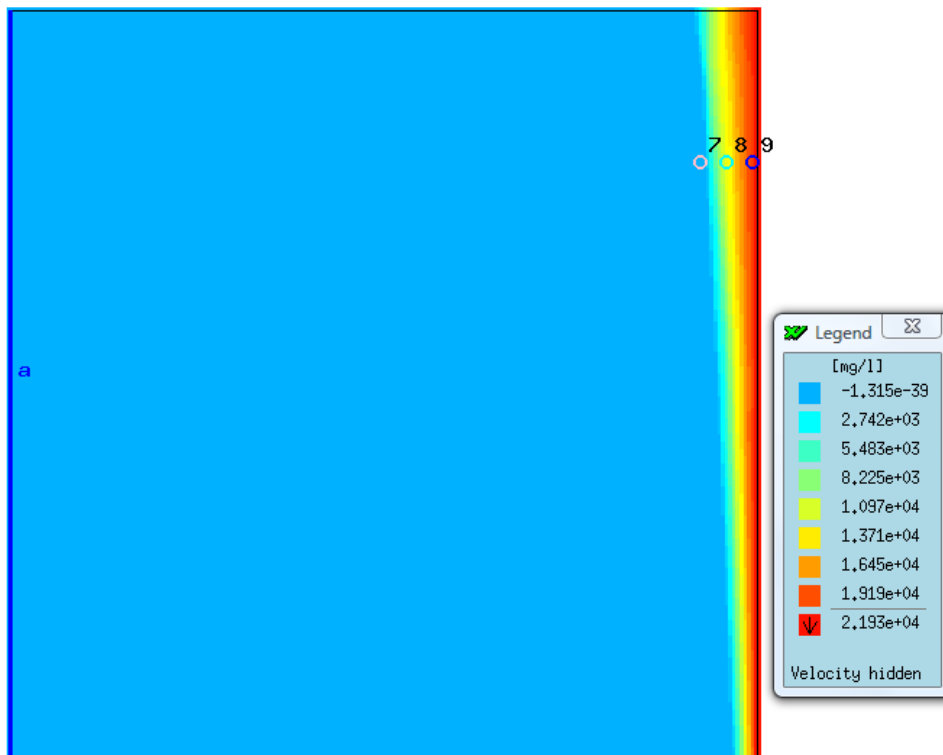
#### 8B.4.1.5.Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.4.1.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.4.1.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.4.1.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

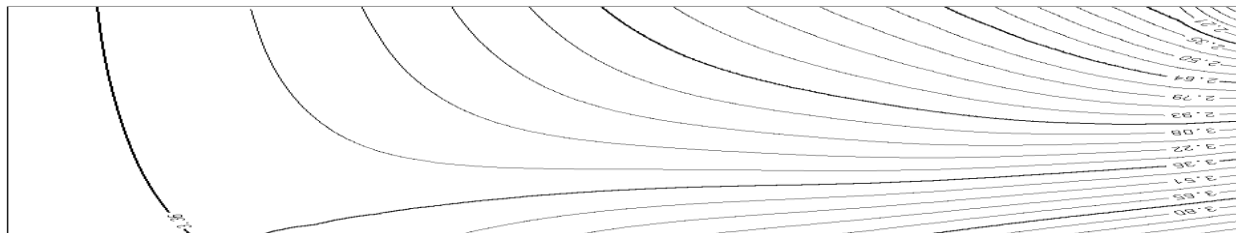
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	8.3	14.8
Στη θέση 7	3.7	5.9
Στη θέση 8	4.6	7

### 8B.4.2. $m_x=0.03$ & $m_y=0.03$

#### 8B.4.2.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped , <math>m_x=0.03</math> &amp; <math>m_y=0.03</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.03
Κλίση $m_y$	0.03
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xh$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yh$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=0.441$ , $N_y=0.441$

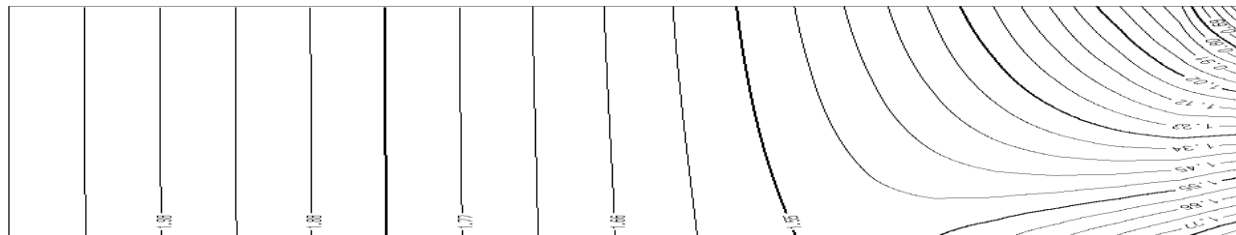
#### 8B.4.2.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



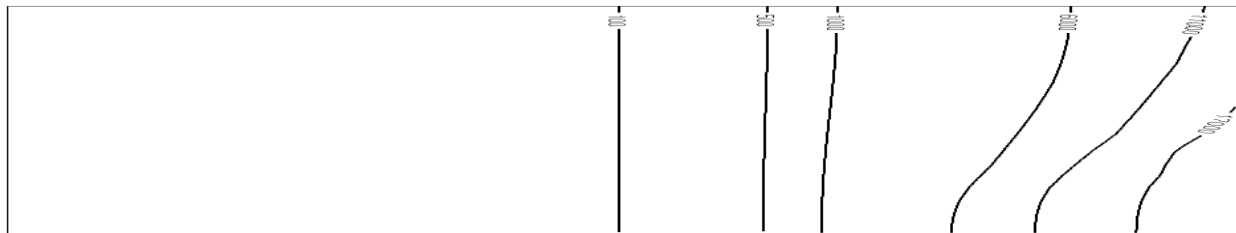
#### 8B.4.2.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



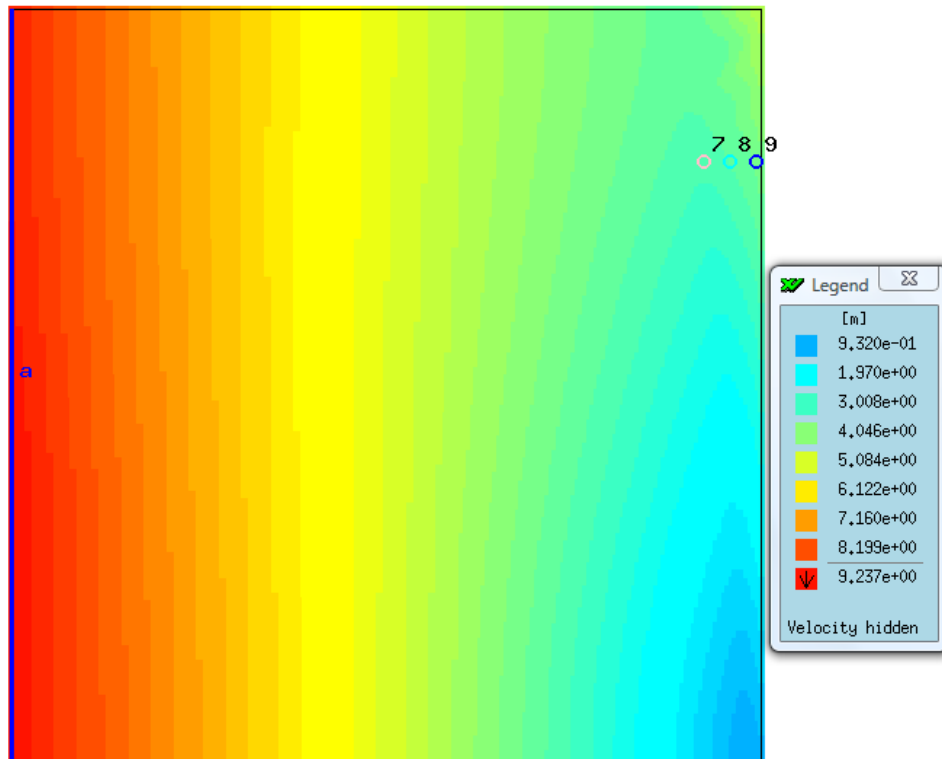
#### 8B.4.2.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



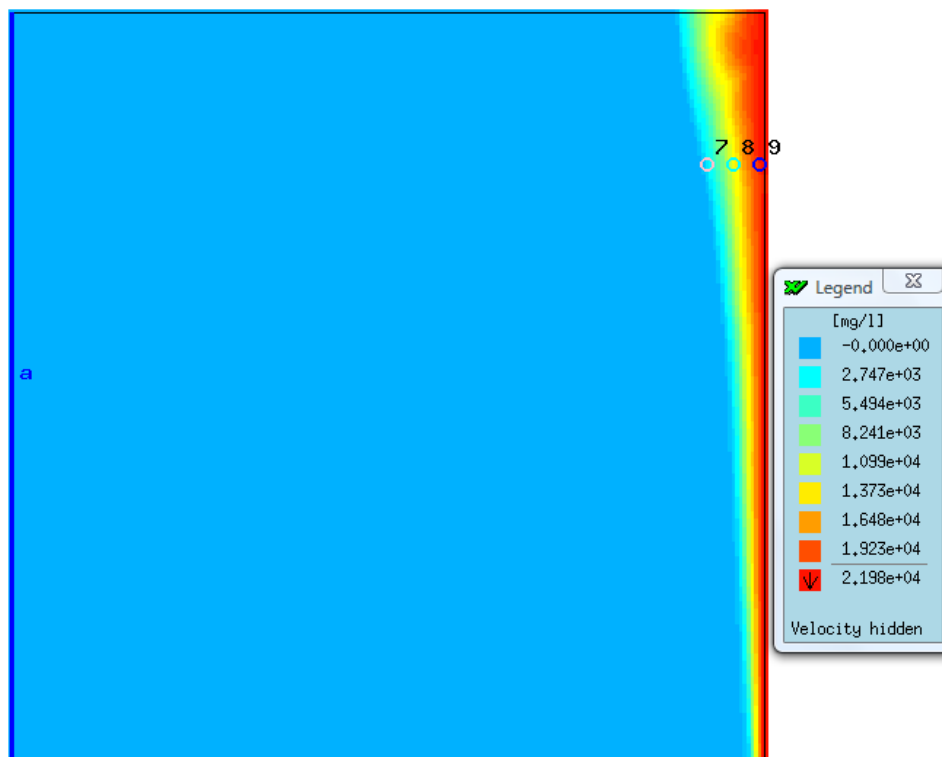
#### 8B.4.2.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.4.2.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.4.2.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.4.2.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

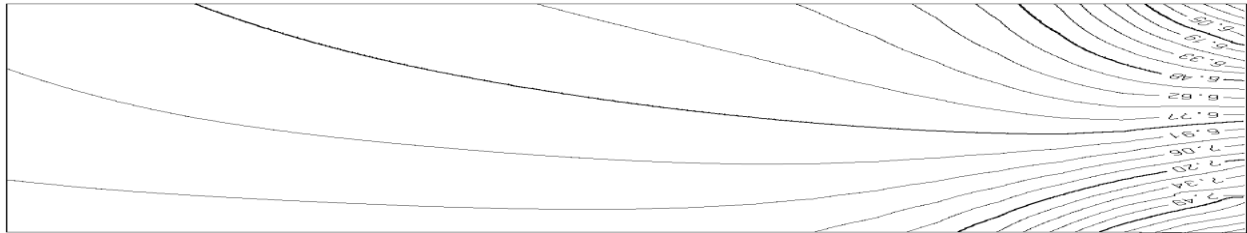
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	11.5	16.3
Στη θέση 7	6.9	9.8
Στη θέση 8	4.7	6.6

### 8B.4.3. $m_x=0.07$ & $m_y=0.07$

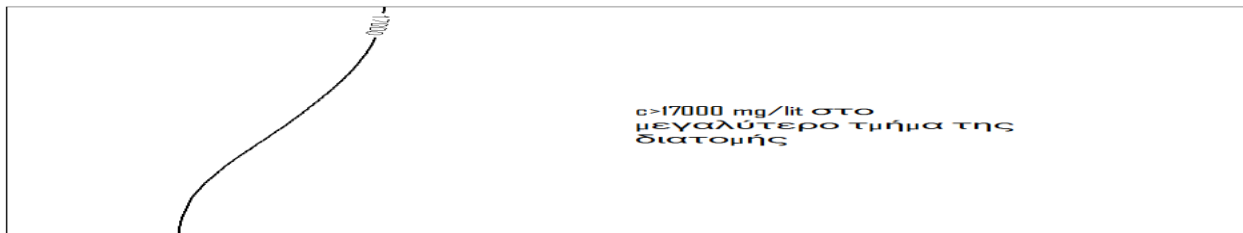
#### 8B.4.3.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped , <math>m_x=0.07</math> &amp; <math>m_y=0.07</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o=1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s=1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.07
Κλίση $m_y$	0.07
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xh$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yh$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.029$ , $N_y=1.029$

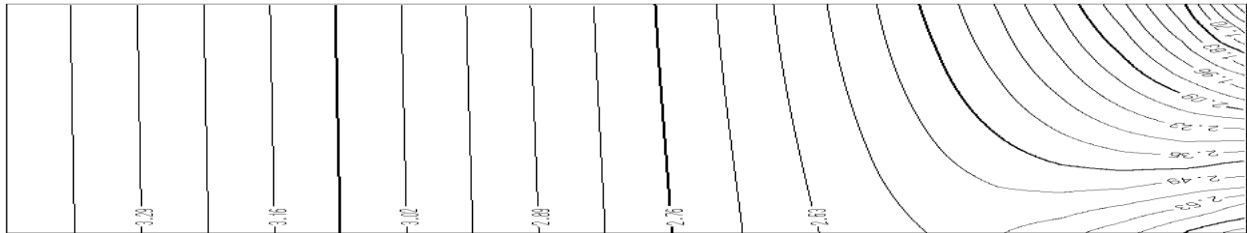
#### 8B.4.3.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



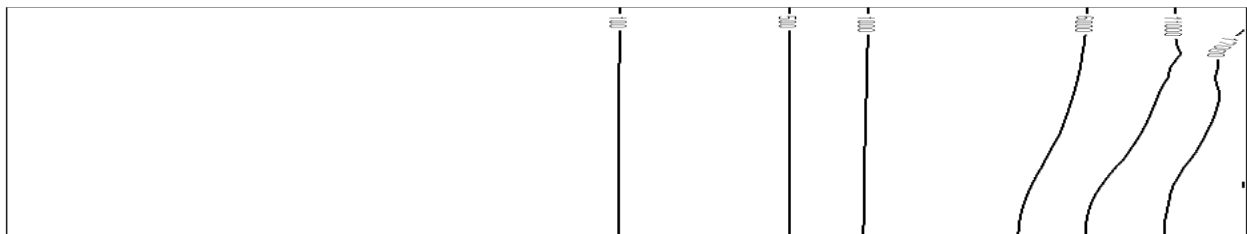
#### 8B.4.3.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



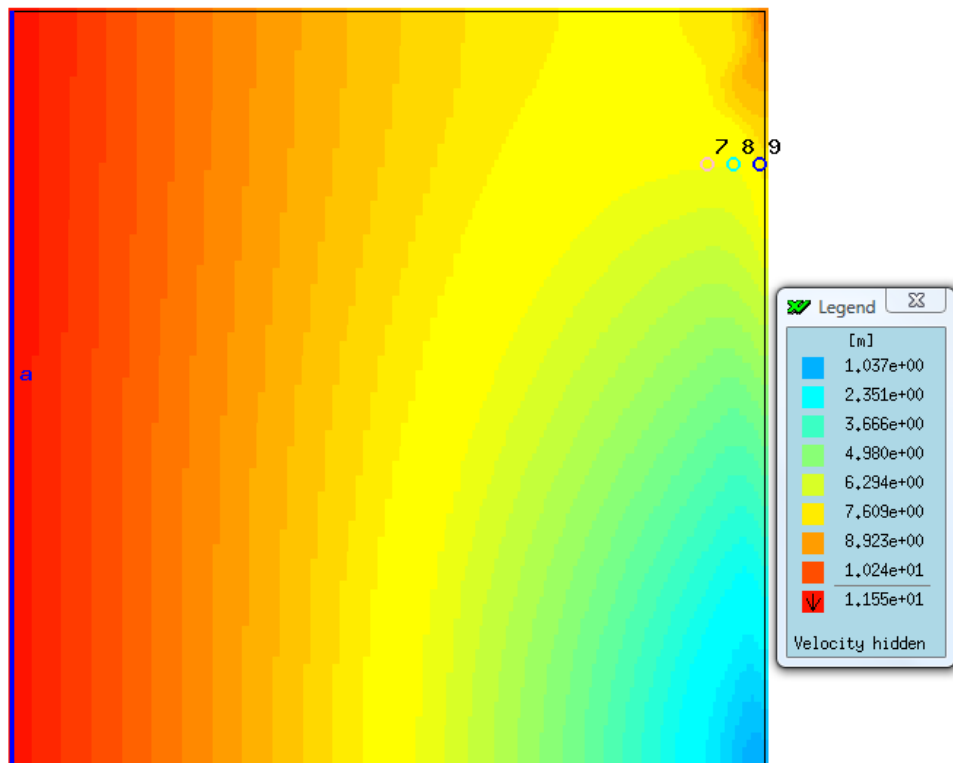
#### 8B.4.3.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



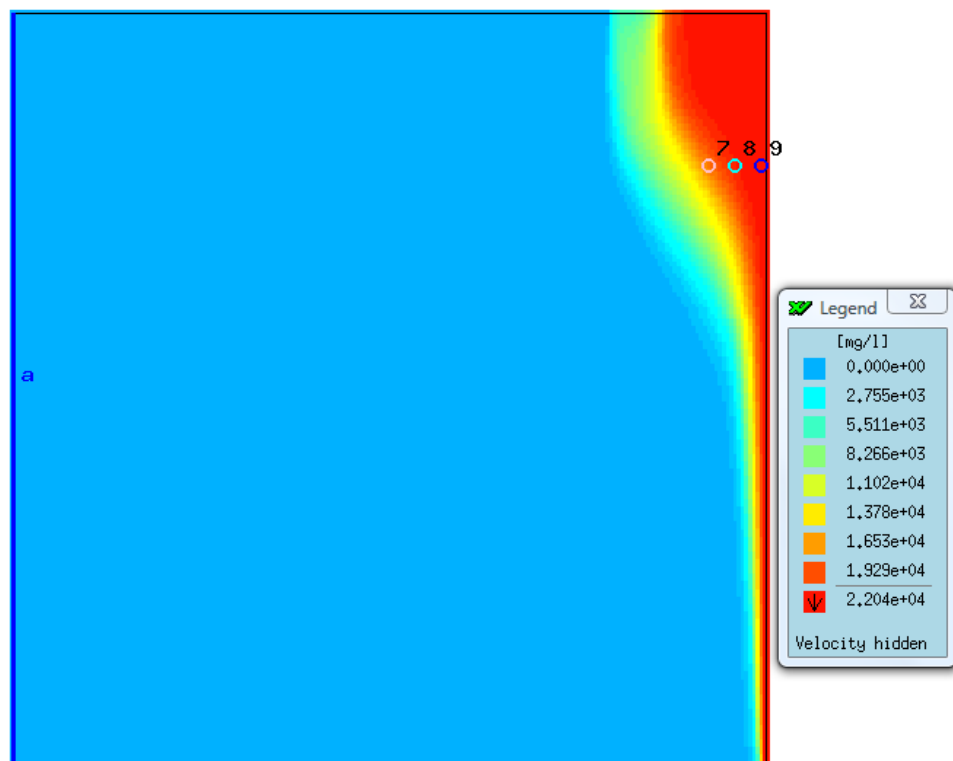
#### 8B.4.3.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.4.3.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.4.3.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



**8B.4.3.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

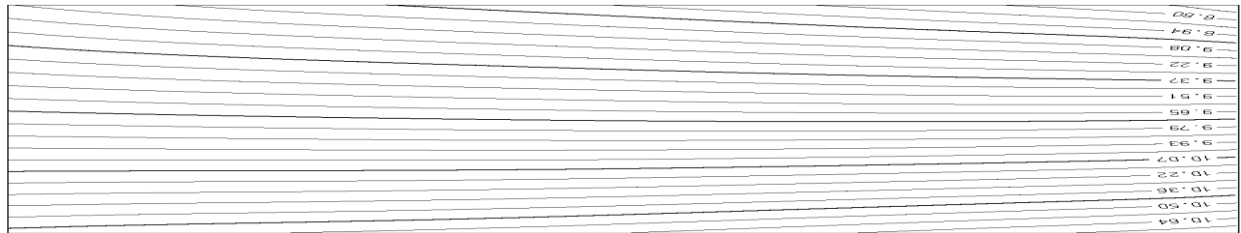
	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	46.4	51
Στη θέση 7	17.8	21.8
Στη θέση 8	28.9	29.5

#### 8B.4.4. $m_x=0.1$ & $m_y=0.1$

##### 8B.4.4.1. Πίνακας μεγεθών και παραμέτρων

<b>Warped , <math>m_x=0.1</math> &amp; <math>m_y=0.1</math> - basic model</b>	
<b>Παράμετροι</b>	
Πορώδες $n$	0.2
Υδραυλική αγωγιμότητα	$1.225 \cdot 10^{-4}$ m/sec
Συντελεστής διάχυσης $D_{diff}$	$10^{-9}$ m <sup>2</sup> /sec
Συντελεστής διαμήκους διασποράς $a_L$	20m
Συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $a_T$	2m
Εισερχόμενη ανάντι ροή $q_{in}$	$2 \cdot 10^{-7}$ m/sec
Πυκνότητα γλυκού νερού	$\rho_o = 1,000$ kg/lit
Πυκνότητα αλμυρού νερού	$\rho_s = 1,024$ kg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο γλυκό νερό $C_o$	0 mg/lit
Συγκέντρωση άλατος στο αλμυρό νερό $C_s$	22000 mg/lit
<b>Χαρακτηριστικά προβλήματος</b>	
Υδροφορέας	Οριζόντιος
Μήκος $l_x$	5000m
Πλάτος $l_y$	5000 m
Ύψος $H$	50 – 100 m
Κλίση $m_x$	0.1
Κλίση $m_y$	0.1
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_xh$ μακριά/κοντά από το σύνορο	50/25 (m)
Διάσταση κάναβου $s_xa/s_yh$ μακριά/κοντά στο σύνορο	50/25 (m)
Στρώσεις	10
Αριθμητικό σχήμα	full upwinding
Αδιάστατοι αριθμοί	$N_x=1.47$ , $N_y=1.47$

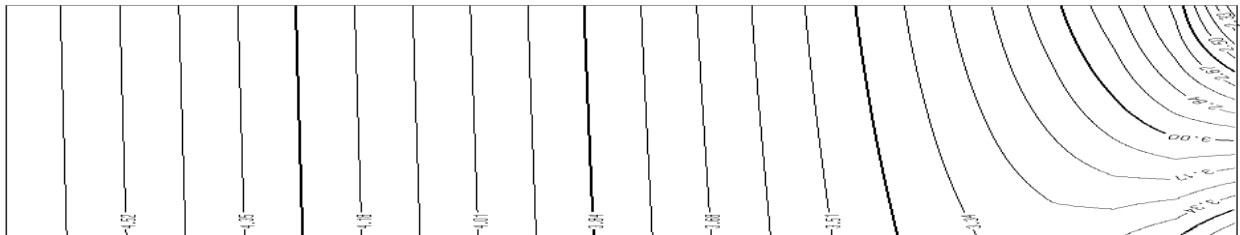
#### 8B.4.4.2. Τομή στη θέση 5 – Ισοδυναμικές



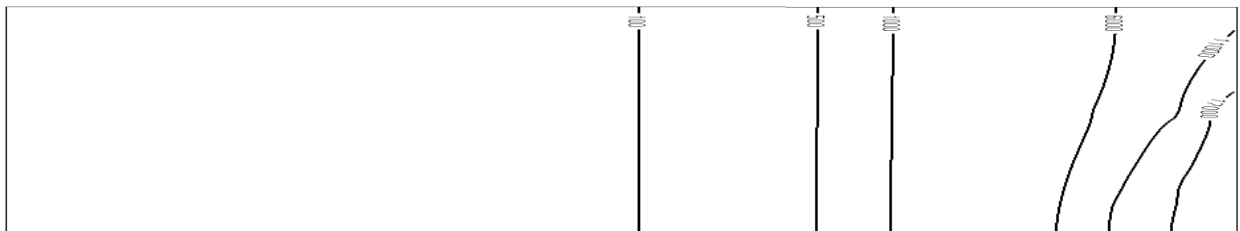
#### 8B.4.4.3. Τομή στη θέση 5 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



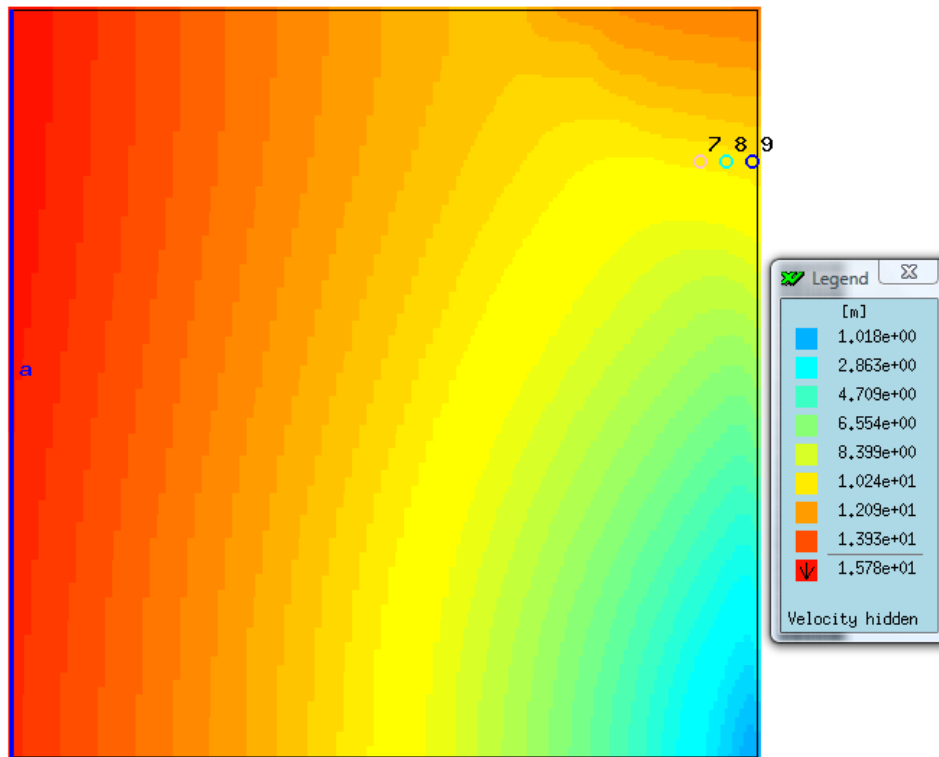
#### 8B.4.4.4. Τομή στη θέση 2 – Ισοδυναμικές



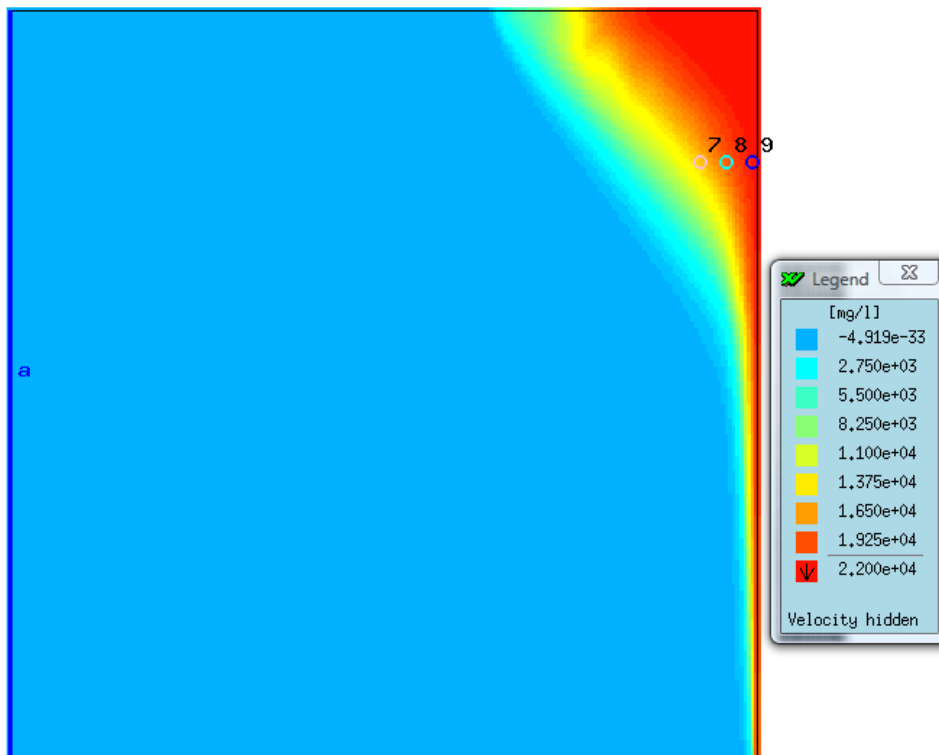
#### 8B.4.4.5. Τομή στη θέση 2 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης



#### 8B.4.4.6.Slice20 – Ισοδυναμικές



#### 8B.4.4.7.Slice20 – Ισογραμμές της συγκέντρωσης





**8B.4.4.8.Πίνακας εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού στο σύνορο – θάλασσα**

	Εισροή από τη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Εκροή στη θάλασσα (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)
Σε όλη την πρόσοψη του υδροφορέα (θέση9)	46.4	51
Στη θέση 7	17.7	21.8
Στη θέση 8	28.9	29.5

## **9. Σύγκριση αποτελεσμάτων βασικών μοντέλων**

### **9.1. Σύγκριση του εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού κατα μήκος του σύνορου-θάλασσα σε σχέση με την κατεύθυνση των κλίσεων του υδροφορέα**

Το σύνορο-θάλασσα χωρίζεται σε τμήματα μήκους χιλίων μέτρων και υπολογίζονται οι ποσότητες εισερχόμενου/εξερχόμενου νερού σε κάθε τμήμα, με το εργαλείο του λογισμικού FEFLOW “Budget Analyzer”. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ραβδόγραμμα.

Υπενθυμίζεται ότι (κεφ.5) το σύνορο-θάλασσα είναι παράλληλο στον άξονα  $y$  και ότι η κλίση (προς τα κάτω)  $m_y$  είναι προς τα θετικά του άξονα  $y$ .

Τονίζεται ότι στο εξερχόμενο νερό συμπεριλαμβάνεται και η ποσότητα γλυκού νερού που φθάνει στη θάλασσα έχοντας εισέλθει στον υδροφορέα από το ανάντι όριο.

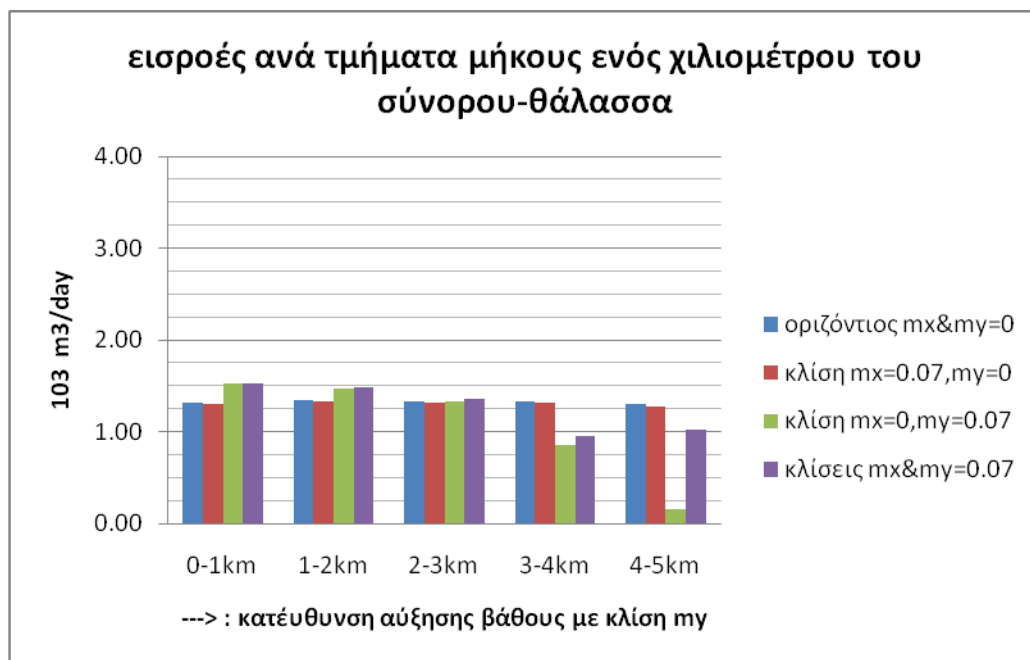
#### **9.1.A. Υδροφορείς σταθερού πάχους**

Συγκρίνονται οι υδροφορείς: i)οριζόντιος, ii)με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$ , iii)με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv)με κλίση  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .

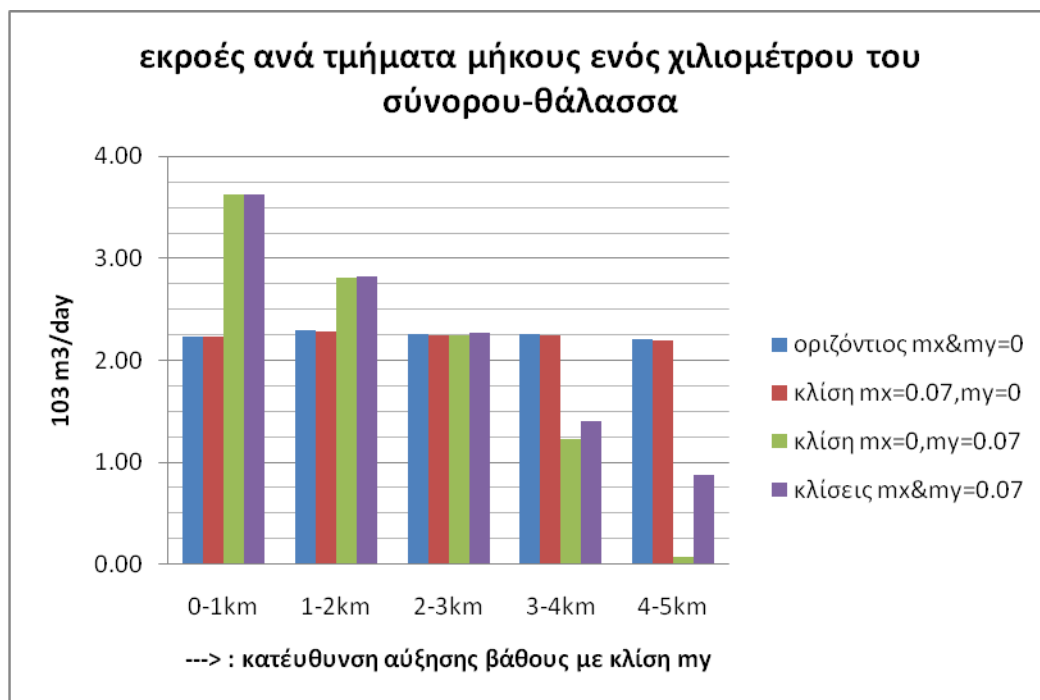
Στον οριζόντιο υδροφορέα και στον υδροφορέα με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα ( $m_x$ ) παρατηρείται ότι οι εισροή είναι ίδια σε κάθε τμήμα του συνόρου. Το ίδιο συμβαίνει και με την εκροή. Είναι γεγονός ότι η υφαλμύρωση σε αυτούς τους δύο υδροφορείς θα μπορούσαν να μελετηθούν και σε ένα επίπεδο διδιαστατό πρόβλημα στο κατακόρυφο επίπεδο.

Στον υδροφορέα με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα ( $m_y$ ) η εισροή και η εκροή είναι μεγαλύτερες στα τμήματα του συνόρου-θάλασσα που βρίσκονται στα ρηχά και μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνει το βάθος. Επίσης, με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διαφορά της εκροής από την εισροή, δηλαδή η από ανάντι ερχόμενη ροή και η εισερχόμενη από τη θάλασσα ροή έχουν την τάση να στραφούν και να εξέλθουν προς τη θάλασσα από την πιο ρηχή περιοχή του υδροφορέα. Από την άλλη πλευρά υπάρχει η τάση για συσσώρευση της διαλυμένης ουσίας (άλατος) στην πιο βαθεία περιοχή, όπως φαίνεται στα γραφήματα της συγκέντρωσης του κεφαλαίου 8.

Στον υδροφορέα με κλίσεις  $m_x$  &  $m_y$ , παρατηρείται μείωση των εισροών και των εκροών με την αύξηση του βάθους. Εξακολουθεί να ισχύει ότι με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διαφορά της εκροής από την εισροή. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα στην πιο ρηχή περιοχή συμπίπτουν με αυτά του υδροφορέα με κλίση  $m_y$ . Στην πιο βαθεία περιοχή, η εισροή και η εκροή είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες του υδροφορέα με κλίση  $m_y$ . Η ύπαρξη της κλίσης  $m_x$  εξασφαλίζει περισσότερη «ορμή» και κυκλοφορία του νερού στα μεγαλύτερα βάθη.



Γράφημα 9.1.A.1.: Υδροφορείς σταθερού πάχους – Εισροές



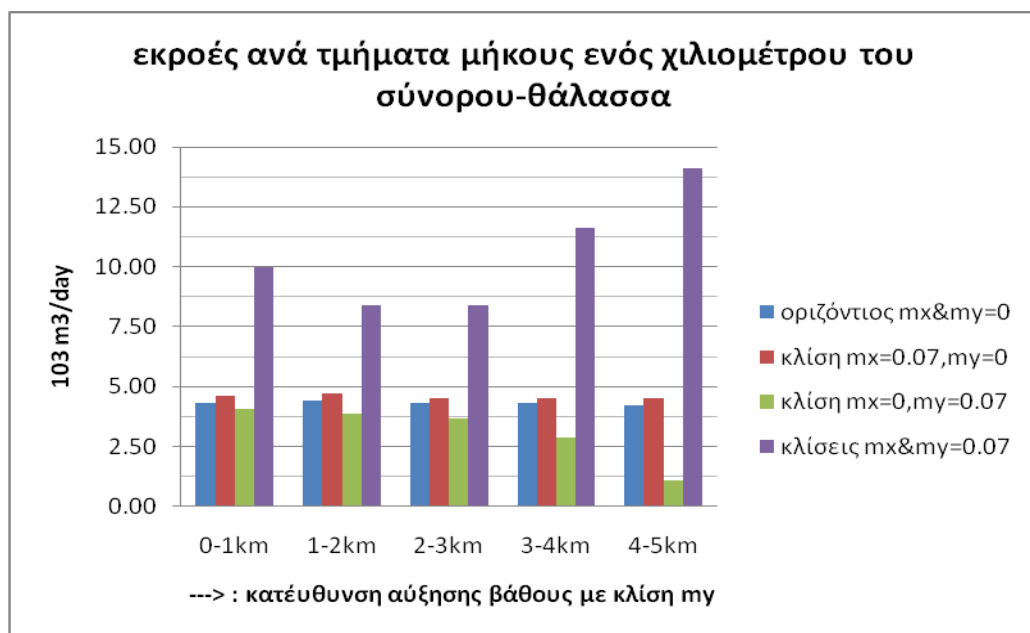
Γράφημα 9.1.A.2.: Υδροφορείς σταθερού πάχους - Εκροές

### 9.1.B. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους

Συγκρίνονται οι υδροφορείς: i)οριζόντιος σταθερού πάχους  $b=100\text{m}$ (καταχρηστικά), ii)με κλίση πυθμένα κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$  , iii)με κλίση πυθμένα υπαράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv)με κλίση πυθμένα  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .



Γράφημα 9.1.B.1.:Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους – Εισροές



Γράφημα 9.1.B.2.:Υδροφορείς μεταβαλλόμενου παχους - Εκροές

Στον οριζόντιο υδροφορέα και στον υδροφορέα με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα (mκ) παρατηρείται ότι οι εισροή είναι ίδια σε κάθε τμήμα του συνόρου. Το ίδιο συμβαίνει και με την εκροή. Είναι γεγονός ότι η υφαλμύρωση σε αυτούς τους δύο υδροφορείς θα μπορούσαν να μελετηθούν και σε ένα επίπεδο διδιαστατό πρόβλημα στο κατακόρυφο επίπεδο.

Ο υδροφορέας με κλίση mκ παρουσιάζει μεγαλύτερες εισροές και εκροές από τον οριζόντιο. Ο οριζόντιος έχει σταθερό πάχος εκατό μέτρα σε όλη του την έκταση ενώ ο υδροφορέας με κλίση mκ έχει πάχος πενήντα μέτρα στο ανάντι όριο και εκατό μέτρα στο σύνορο-θάλασσα. Επιπλέον η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου (σταθερή ειδική παροχή). Έτσι, στον υδροφορέα με κλίση mκ το από ανάντι ερχόμενο νερό φθάνει κοντά στο σύνορο-θάλασσα με μειωμένη «ορμή» (λόγω του αυξανόμενου πάχους) και η εισροή θαλασσινού νερού, οπότε και η συνολική εκροή, είναι αυξημένες.

Στον υδροφορέα με κλίση mγ, παράλληλα προς τη θάλασσα πραγματοποιείται πτώση υψομέτρου και αύξηση του πάχους. Το αποτέλεσμα είναι η κατανομή των εισροών να παρουσιάζει μέγιστο στο μέσο του συνόρου-θάλασσα. Η εκροή είναι μεγαλύτερη στη ρηχότερη περιοχή και μειώνεται προς τη βαθεία περιοχή του συνόρου. Με την αύξηση του βάθους μειώνεται και η διαφορά της εκροής από την εισροή, δηλαδή η από ανάντι ερχόμενη ροή και η εισερχόμενη από τη θάλασσα ροή έχουν την τάση να στραφούν και να εξέλθουν στη θάλασσα από την πιο ρηχή περιοχή του υδροφορέα. Από την άλλη πλευρά υπάρχει η τάση για συσσώρευση της διαλυμένης ουσίας (άλατος) στην πιο βαθεία περιοχή, όπως φαίνεται στα γραφήματα της συγκέντρωσης του κεφαλαίου 8.

Στον υδροφορέα με κλίσεις mκ&mγ, συνυπάρχει πτώση υψομέτρου και αύξηση πάχους προς δύο κατευθύνσεις. Το αποτέλεσμα είναι οι εισροές και οι εκροές να παρουσιάζουν ελάχιστο στο μέσο του συνόρου-θάλασσα. Εξακολουθεί να ισχύει ότι με την αύξηση του βάθους μειώνεται η διαφορά της εισροής από την εκροή. Μάλιστα, λόγω του αυξανόμενου πάχους στο βαθύτερο τμήμα παρατηρείται η εισροή να είναι μεγαλύτερη από την εκροή. Τέλος, παρατηρείται ότι οι εισροές και οι εκροές είναι ιδιαίτερα αυξημένες σε σχέση με τους υπόλοιπους υδροφορείς.

## 9.2. Σύγκριση της κατανομής συγκέντρωσης άλατος σε σχέση με τον αδιάστατο αριθμό $N_{by}$ .

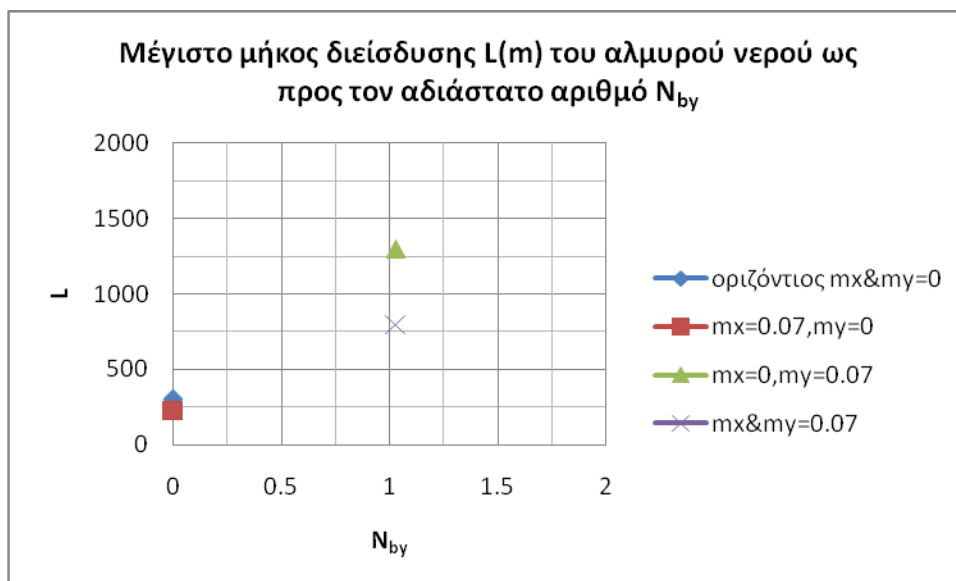
Υπενθυμίζεται (ενότητα 6.6) ότι ο αδιάστατος αριθμός  $N_{by}$  είναι ενδεικτικός της σχέσης μεγέθους που έχει η ροή προς τη θάλασσα με τη ροή λόγω άνωσης κατά την κάθετη στην αρχική ταχύτητα διεύθυνση (δηλαδή την παράλληλη στην ακτή) και ορίζεται (εξίσωση 6.6.2):

$$N_{by} = \frac{\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} K m_y}{q_{in}}$$

### 9.2.A. Υδροφορείς σταθερού πάχους

Συγκρίνονται οι υδροφορείς : i)οριζόντιος, ii)με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$ , iii)με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv)με κλίση  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .

Για τη σύγκριση επιλέχθηκε η ισογραμμή 100 mg/lit (όριο πόσιμου νερού). Συγκρίνεται η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα σε σχέση με την τιμή του αδιάστατου αριθμού  $N_{by}$ . Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού».



Γράφημα 9.2.A.1: Μέγιστο μήκος διείσδυσης  $L$  – Αδιάστατος αριθμός  $N_{by}$ , Υδροφορείς σταθερού πάχους

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή  $N_{by}$ , τόσο πιο σημαντική είναι η ροή λόγω άνωσης κατά την κάθετη στην αρχική ταχύτητα διεύθυνση (δηλαδή την παράλληλη στην ακτή). Από το γράφημα φαίνεται ότι η αύξηση αυτή αντιστοιχεί σε σημαντική αύξηση του μήκους διείσδυσης του αλμυρού νερού. Το γράφημα αναδεικνύει την επίδραση της κλίσης του πυθμένα του υδροφορέα προς κατεύθυνση κάθετη στην από ανάντι εισερχόμενη ροή.

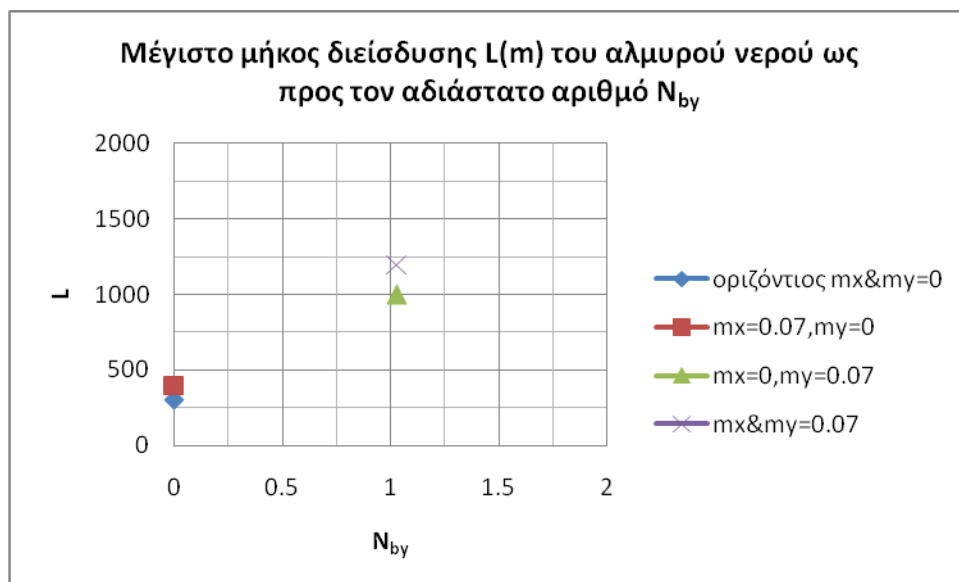
Ο οριζόντιος υδροφορέας και ο υδροφορέας με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα έχουν ίδια τιμή  $L$ . Όταν η συννοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου (σταθερή εισροή), η αύξηση της πίεσης στο σύνορο-θάλασσα (λόγω μεγαλύτερου βάθους) δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή της συγκέντρωσης.

Ο υδροφορέας με διπλή κλίση  $m_x$  &  $m_y$  έχει πολύ μικρότερη τιμή  $L$  από τον υδροφορέα μόνο με κλίση  $m_y$ . Η ύπαρξη της κλίσης  $m_x$  εξασφαλίζει περισσότερη «όρμη» στο από ανάντι ερχόμενο γλυκό νερό.

## 9.2.B. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους

Συγκρίνονται οι υδροφορείς: i) οριζόντιος σταθερού πάχους  $b=100\text{m}$  (καταχρηστικά), ii) με κλίση πυθμένα κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$ , iii) με κλίση πυθμένα υπαράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv) με κλίση πυθμένα  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .

Για τη σύγκριση επιλέχθηκε η ισογραμμή  $100\text{ mg/lit}$  (όριο πόσιμου νερού). Συγκρίνεται η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα σε σχέση με την τιμή του αδιάστατου αριθμού  $N_{by}$ . Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού».



**Γράφημα 9.2.B.1: Μέγιστο μήκος διείσδυσης  $L$  – Αδιάστατος αριθμός  $N_{by}$ , Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους**

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή  $N_{by}$ , τόσο πιο σημαντική είναι η ροή λόγω άνωσης κατά την κάθετη στην αρχική ταχύτητα διεύθυνση (δηλαδή την παράλληλη στην άκρη). Ωστόσο, το μεταβαλλόμενο πάχος κατά την κατεύθυνση των κλίσεων διαφοροποιεί τα αποτελέσματα σε σχέση με τους υδροφορείς σταθερού πάχους.

Ο οριζόντιος έχει σταθερό πάχος εκατό μέτρα σε όλη του την έκταση ενώ ο υδροφορέας με κλίση  $m_x$  έχει πάχος πενήντα μέτρα στο ανάντι όριο και εκατό μέτρα στο σύνορο-θάλασσα. Επιπλέον η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου (σταθερή ειδική παροχή). Έτσι, στον υδροφορέα με κλίση  $m_x$  το από ανάντι ερχόμενο νερό φθάνει κοντά στο σύνορο-θάλασσα με μειωμένη «ορμή» (λόγω του αυξανόμενου πάχους) και το μέγιστο μήκος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο. Ωστόσο, όπως φαίνεται από το γράφημα η διαφορά αυτή είναι σχετικά μικρή.

Ο υδροφορέας με διπλή κλίση  $m_x$  &  $m_y$  έχει μεγαλύτερη τιμή  $L$  από τον υδροφορέα μόνο με κλίση  $m_y$ , λόγω του αυξανόμενου πάχους προς τις δύο κατευθύνσεις.

### **9.3. Σύγκριση της εισερχόμενης/εξερχόμενης ποσότητας διαλυμένης ουσίας (άλατος) κατα μήκος του σύνορου-θάλασσα σε σχέση με την κατεύθυνση των κλίσεων του υδροφορέα**

Το σύνορο-θάλασσα χωρίζεται σε τμήματα μήκους χιλίων μέτρων και υπολογίζονται η εισερχόμενη και η εξερχόμενη ποσότητα διαλυμένης ουσίας σε κάθε τμήμα, με το εργαλείο του λογισμικού FEFLOW “Budget Analyzer – Contaminant mass flux”. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ραβδόγραμμα.

Υπενθυμίζεται ότι (κεφ.5) το σύνορο-θάλασσα είναι παράλληλο στον άξονα  $y$  και ότι η κλίση (προς τα κάτω)  $m_y$  είναι προς τα θετικά του άξονα  $y$ .

#### **9.3.A. Υδροφορείς σταθερού πάχους**

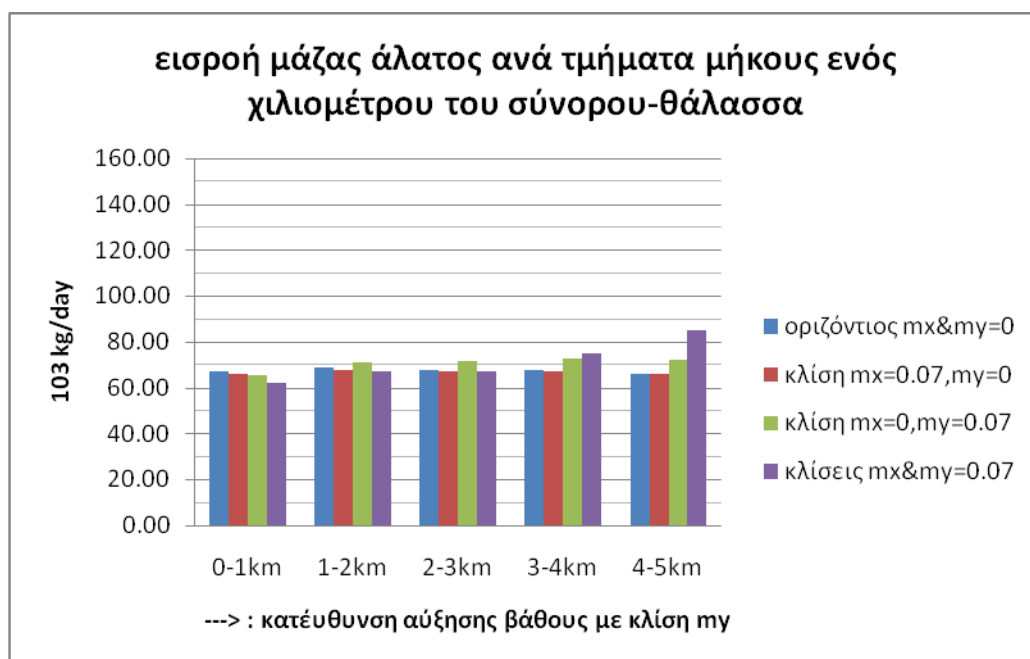
Συγκρίνονται οι υδροφορείς: i) οριζόντιος, ii) με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$ , iii) με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv) με κλίση  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .

Στον οριζόντιο υδροφορέα και στον υδροφορέα με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα ( $m_x$ ) η εισροή μάζας άλατος θεωρητικά πρέπει να είναι ίδια σε κάθε τμήμα του συνόρου. Στα παρακάτω γραφήματα παρατηρούνται αυξομειώσεις όχι μεγαλύτερες από 4%, που αποδίδονται σε αριθμητικά σφάλματα που προκύπτουν κατά την επίλυση του μοντέλου. Το ίδιο συμβαίνει και με την εκροή μάζας άλατος.

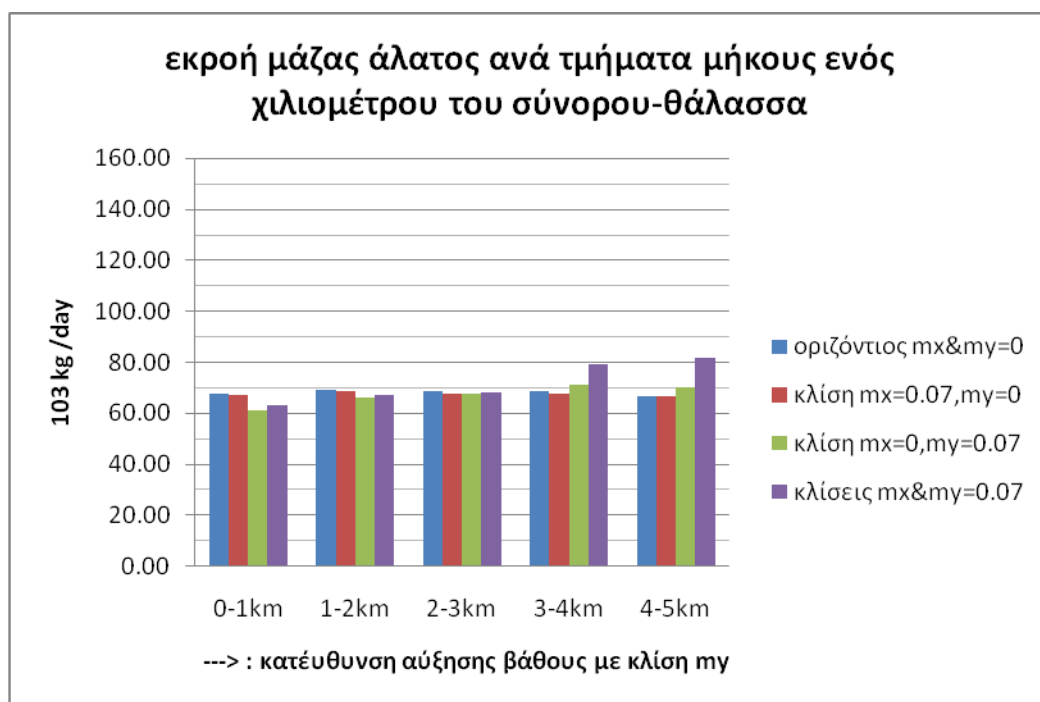
Στον υδροφορέα με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα ( $m_y$ ) η εισροή μάζας άλατος αυξάνεται με την αύξηση του βάθους. Η συνολική ποσοστιαία αύξηση δεν ξεπερνά το 10%. Η εκροή μάζας άλατος αυξάνεται με την αύξηση του βάθους. Η συνολική ποσοστιαία αύξηση είναι 16%. Υπενθυμίζεται ότι αυξανόμενου του βάθους η εισροή και η εκροή νερού μειώνεται αλλά η συγκέντρωση αυξάνεται.

Στον υδροφορέα με κλίσεις  $m_x$  &  $m_y$ , η εισροή και η εκροή μάζας άλατος αυξάνεται με την αύξηση του βάθους.





Γράφημα 9.3.A.1.: Υδροφορείς σταθερού πάχους – Εισροή μάζας άλατος



Γράφημα 9.3.A.2.: Υδροφορείς σταθερού πάχους – Εκροή μάζας άλατος

### 9.3.B. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους

Συγκρίνονται οι υδροφορείς: i)οριζόντιος σταθερού πάχους  $b=100\text{m}$ (καταχρηστικά), ii)με κλίση πυθμένα κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_x=0.07$  , iii)με κλίση πυθμένα υπαράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα  $m_y=0.07$ , iv)με κλίση πυθμένα  $m_x=0.07$  &  $m_y=0.07$ .



Γράφημα 9.3.B.1.:Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους – Εισροές



Γράφημα 9.3.B.2.:Υδροφορείς μεταβαλλόμενου παχους - Εκροές

Στον οριζόντιο υδροφορέα και στον υδροφορέα με κλίση κάθετη προς το σύνορο-θάλασσα (m<sub>x</sub>) η εισροή μάζας άλατος θεωρητικά πρέπει να είναι ίδια σε κάθε τμήμα του συνόρου. Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρούνται αυξομειώσεις περίπου 6%, που αποδίδονται σε αριθμητικά σφάλματα που προκύπτουν κατά την επίλυση του μοντέλου. Το ίδιο συμβαίνει και με την εκροή μάζας άλατος.

Ο υδροφορέας με κλίση m<sub>x</sub> παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες εισροές και εκροές μάζας άλατος από τον οριζόντιο. Ο οριζόντιος έχει σταθερό πάχος εκατό μέτρα σε όλη του την έκταση ενώ ο υδροφορέας με κλίση m<sub>x</sub> έχει πάχος πενήντα μέτρα στο ανάντι όριο και εκατό μέτρα στο σύνορο-θάλασσα. Επιπλέον η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου (σταθερή ειδική παροχή). Έτσι, στον υδροφορέα με κλίση m<sub>x</sub> το από ανάντι ερχόμενο νερό φθάνει κοντά στο σύνορο-θάλασσα με μειωμένη «ορμή» (λόγω του αυξανόμενου πάχους) και η εισροή θαλασσινού νερού και άλατος, οπότε και η συνολική εκροή, είναι αυξημένες.

Στον υδροφορέα με κλίση παράλληλη προς το σύνορο-θάλασσα (m<sub>y</sub>) παρατηρείται αύξηση της εισροής και της εκροής μάζας προς τη βαθύτερη περιοχή του συνόρου. Η ποσοστιαία αύξηση μεταξύ των δύο άκρων του συνόρου είναι 20-25%.

Στον υδροφορέα με κλίσεις m<sub>x</sub> & m<sub>y</sub>, η κατανομή της εισροής και της εκροής παρουσιάζει ελάχιστο στο μέσο του υδροφορέα και η μέγιστη τιμή παρατηρείται στο βαθύτερο σημείο. Το αυξανόμενο πάχος προς τις δύο κατευθύνσεις έχει ως αποτέλεσμα την ιδιαίτερα αυξημένη εισροή και της εκροής μάζας σε σχέση με τους άλλους υδροφορείς.

## **10. Διερεύνηση για μεγαλύτερες τιμές ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ )**

Σε όλα τα μοντέλα που αναφέρονται εκτός του παρόντος κεφαλαίου (βασικά μοντέλα) η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι σταθερή εισερχόμενη ειδική παροχή  $q_{in} = 0.018\text{m/day}$ . Σε ορισμένα από τα μοντέλα αυτά τέθηκε μεγαλύτερη τιμή  $q_{in}$  και διερευνήθηκε η επίδραση στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, για τους οριζόντιους υδροφορείς και τους κεκλιμένους υδροφορείς με κλίση  $m_x$  ή/και  $m_y$  ίση με 0.01, 0.07, 0.1 δημιουργήθηκαν και εκτελέστηκαν τα μοντέλα με τιμές εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι όριο  $q_{in} = 0.036\text{m/day}$ ,  $q_{in} = 0.054\text{m/day}$ ,  $q_{in} = 0.072\text{m/day}$ . Το καθένα από τα μοντέλα αυτά δεν παρουσιάζεται αναλυτικά όπως τα βασικά μοντέλα του κεφαλαίου 8. Τα αρχεία βρίσκονται σε χωριστό φάκελο στο συνοδευτικό dvd.

Εδώ παρουσιάζονται οι τιμές ορισμένων μεγεθών και η διακύμανση τους σε σχέση με την τιμή της εισροής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ).

### **10.1.Συγκέντρωση άλατος – Μέγιστο μήκος διείσδυσης**

Για τη σύγκριση επιλέγεται η ισογραμμή 100mg/lit (όριο πόσιμου νερού). Παρουσιάζεται η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα σε σχέση με την τιμή της εισροής στον ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ). Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού L».

#### **10.1.A.Υδροφορείς σταθερού πάχους**

Η αύξηση της τιμής της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) έχει, γενικά, ως αποτέλεσμα την μείωση του μέγιστου μήκους διείσδυσης (L).

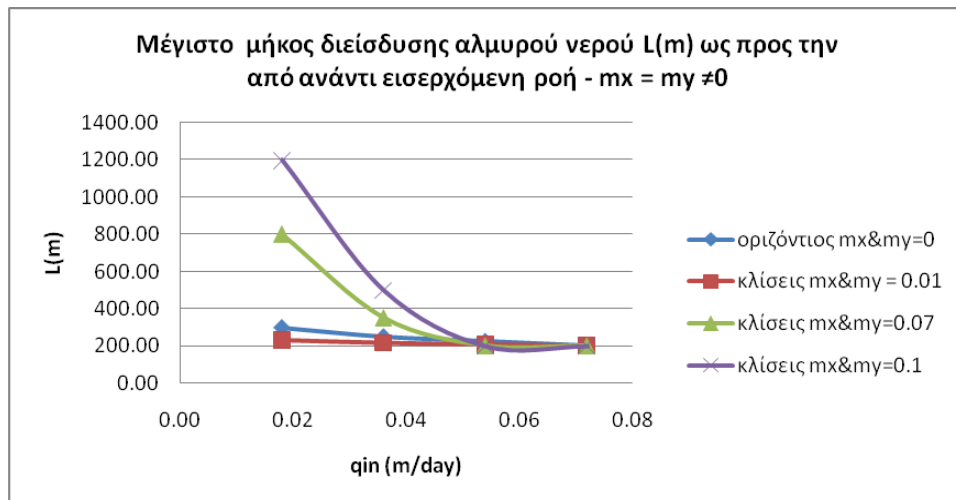
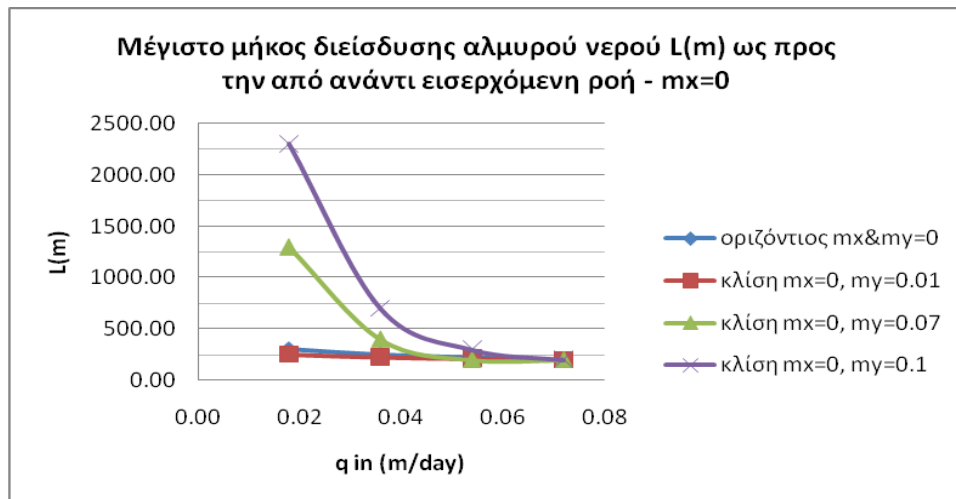
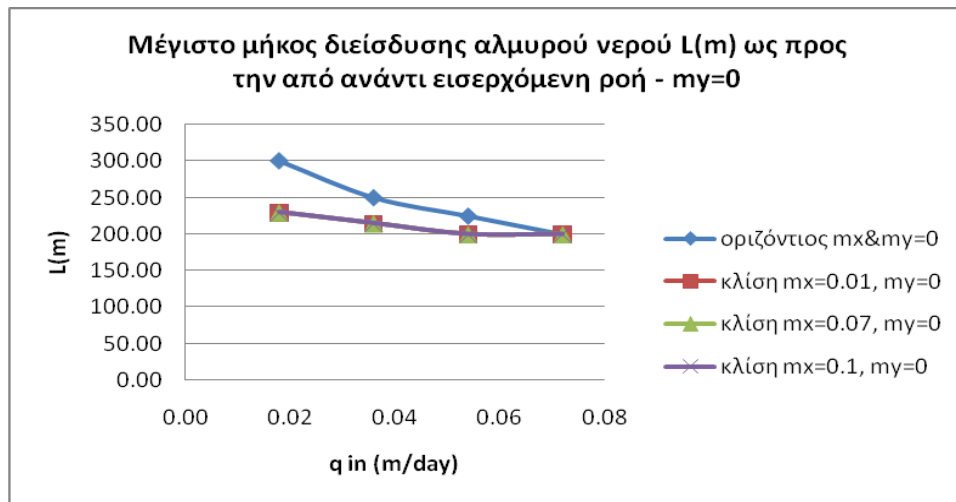
Ο οριζόντιος υδροφορέας παρουσιάζει μεγαλύτερο μήκος διείσδυσης (L) από τους υδροφορείς με κλίση προς τη θάλασσα.

Στους υδροφορείς με κλίση προς τη θάλασσα ( $m_x$ ) το μήκος διείσδυσης παρουσιάζει μικρή μεταβολή (μείωση 10%), καθώς η τιμή της ειδικής παροχής ανάντι ( $q_{in}$ ) αυξάνεται. Διαφαίνεται μία τάση σταθεροποίησης για τις μεγαλύτερες τιμές  $q_{in}$ . Η μεταβολή της κλίσης  $m_x$  δεν επηρεάζει το μέγιστο μήκος διείσδυσης, για το εύρος των  $q_{in}$  που εφαρμόστηκαν, ακριβώς επειδή η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου.

Ο οριζόντιος υδροφορέας παρουσιάζει μικρότερο μήκος διείσδυσης (L) από τους υδροφορείς με κλίση ( $m_y$ ) κάθετη προς την κατεύθυνση της από ανάντι εισερχόμενης ροής ( $q_{in}$ ).

Στους υδροφορείς με κλίση ( $m_y$ ) κάθετη προς την κατεύθυνση της από ανάντι εισερχόμενης ροής ( $q_{in}$ ), η μεταβολή της  $q_{in}$  έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του L. Η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της κλίσης  $m_y$ . Για κάθε κλίση  $m_y$ , το L σταθεροποιείται σε μία τιμή για τις μεγαλύτερες τιμές  $q_{in}$ . Η τιμή αυτή, μάλιστα, φαίνεται να είναι ίδια για όλες τις κλίσεις  $m_y$ . Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι υδροφορείς με διπλή κλίση  $m_x$  &  $m_y$ .

Γραφήματα 10.1.A.1/2/3: Μέγιστο μήκος διείσδυσης αλμυρού νερού  $L(m)$  - Υδροφορείς σταθερού πάχους



### 10.1.B. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους

Η αύξηση της τιμής της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) έχει, γενικά, ως αποτέλεσμα την μείωση του μέγιστου μήκους διείσδυσης ( $L$ ).

Ο οριζόντιος υδροφορέας παρουσιάζει μικρότερο μήκος διείσδυσης ( $L$ ) από τους υδροφορείς με κλίση προς τη θάλασσα ( $m\alpha$ ). Ο οριζόντιος υδροφορέας που συγκρίνεται με τους υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους έχει σταθερό πάχος εκατό μέτρα σε όλη του την έκταση ενώ ο υδροφορέας με κλίση  $m\alpha$  έχει πάχος πενήντα μέτρα στο ανάντι όριο και εκατό μέτρα στο σύνορο-θάλασσα. Επιπλέον η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου (σταθερή ειδική παροχή). Έτσι, στον υδροφορέα με κλίση  $m\alpha$  το από ανάντι ερχόμενο νερό φθάνει κοντά στο σύνορο-θάλασσα με μειωμένη «ορμή» (λόγω του αυξανόμενου πάχους) και το μέγιστο μήκος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο.

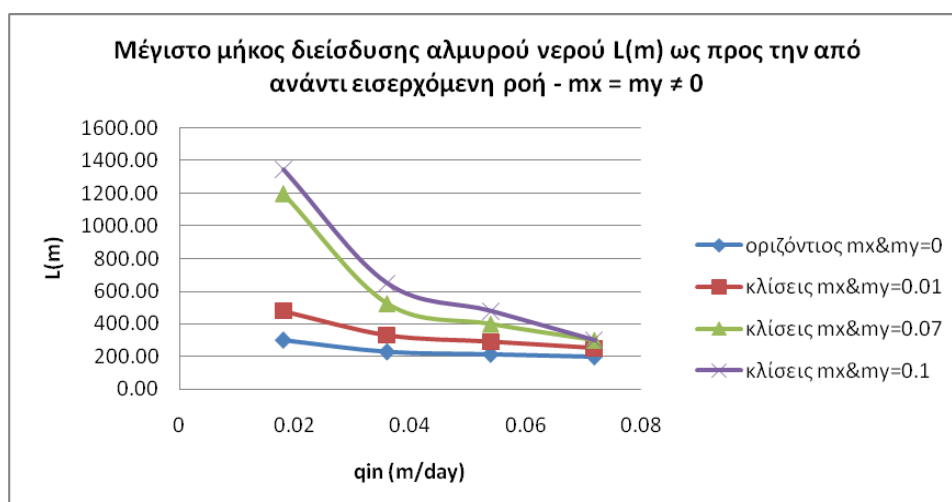
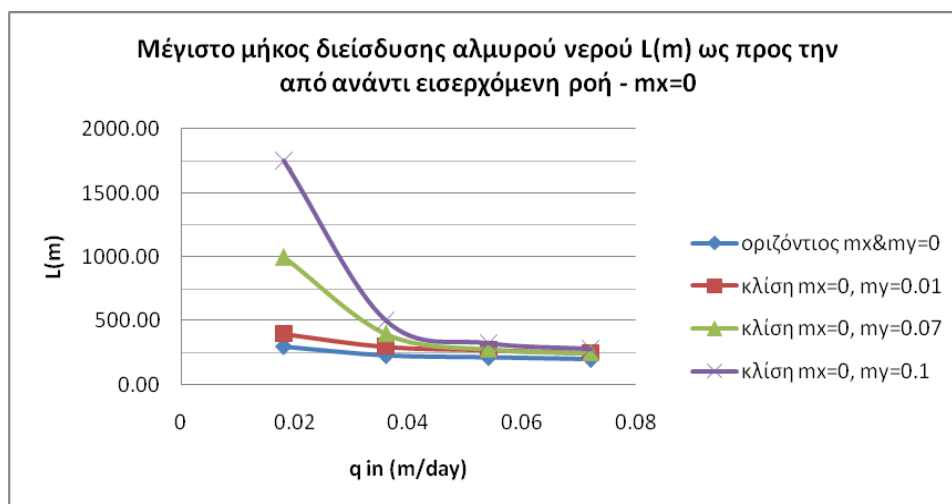
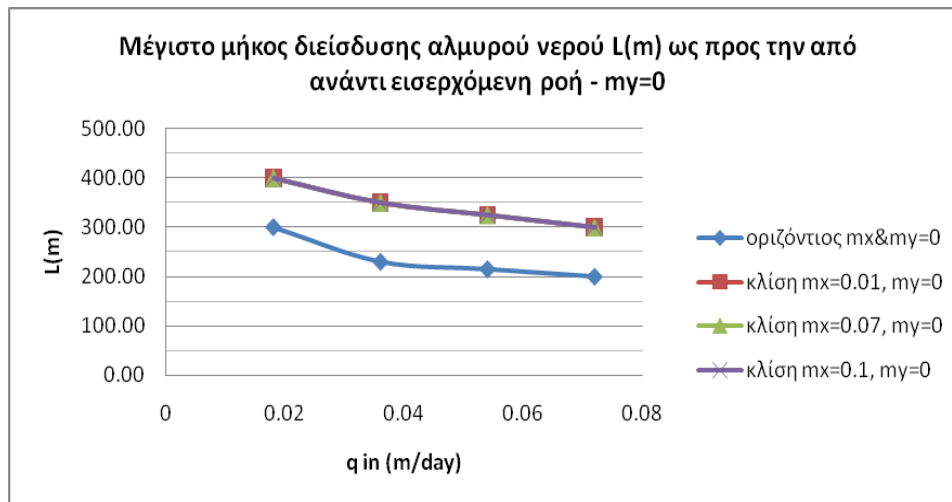
Στους υδροφορείς με κλίση προς τη θάλασσα ( $m\alpha$ ) το μήκος διείσδυσης παρουσιάζει μείωση 25-30%, καθώς η τιμή της ειδικής παροχής ανάντι ( $q_{in}$ ) αυξάνεται. Η μεταβολή της κλίσης  $m\alpha$  φαίνεται να μην επηρεάζει το μέγιστο μήκος διείσδυσης, για το εύρος των  $q_{in}$  που εφαρμόστηκαν, ακριβώς επειδή η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι δεύτερου τύπου, παρά το μεταβαλλόμενο πάχος.

Ο οριζόντιος υδροφορέας παρουσιάζει μικρότερο μήκος διείσδυσης ( $L$ ) από τους υδροφορείς με κλίση ( $m\gamma$ ) κάθετη προς την κατεύθυνση της από ανάντι εισερχόμενης ροής ( $q_{in}$ ).

Στους υδροφορείς με κλίση ( $m\gamma$ ) κάθετη προς την κατεύθυνση της από ανάντι εισερχόμενης ροής ( $q_{in}$ ), η μεταβολή της  $q_{in}$  έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του  $L$ . Η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της κλίσης  $m\gamma$ . Για κάθε κλίση  $m\gamma$ , το  $L$  σταθεροποιείται σε μία τιμή για τις μεγαλύτερες τιμές  $q_{in}$ . Η τιμή αυτή, μάλιστα, φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ των διακοσίων και τριακοσίων μέτρων για όλες τις κλίσεις που εφαρμόστηκαν.

Στους υδροφορείς με διπλή κλίση  $m\alpha$  &  $m\gamma$  η μεταβολή της  $q_{in}$  έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του  $L$  και επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της κλίσης  $m\gamma$ .

Γραφήματα 10.1.B.1/2/3: Μέγιστο μήκος διείσδυσης αλμυρού νερού  $L(m)$ , Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους



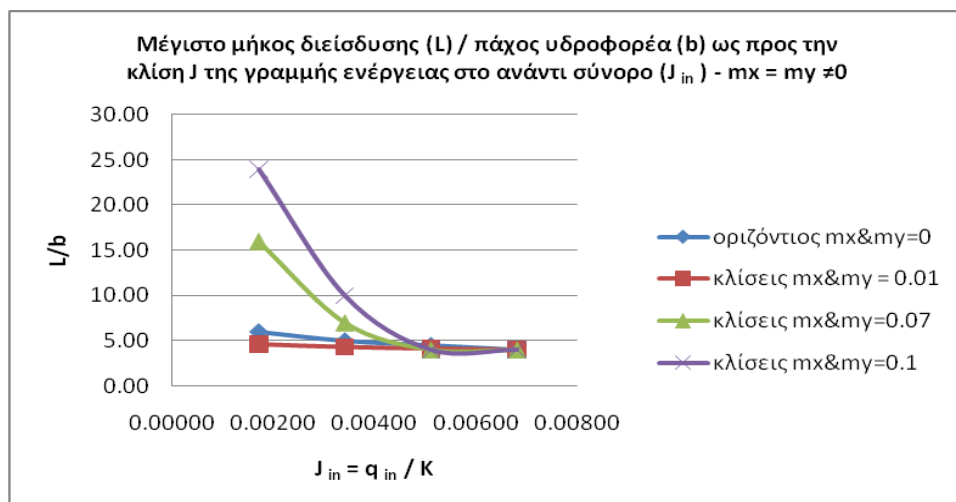
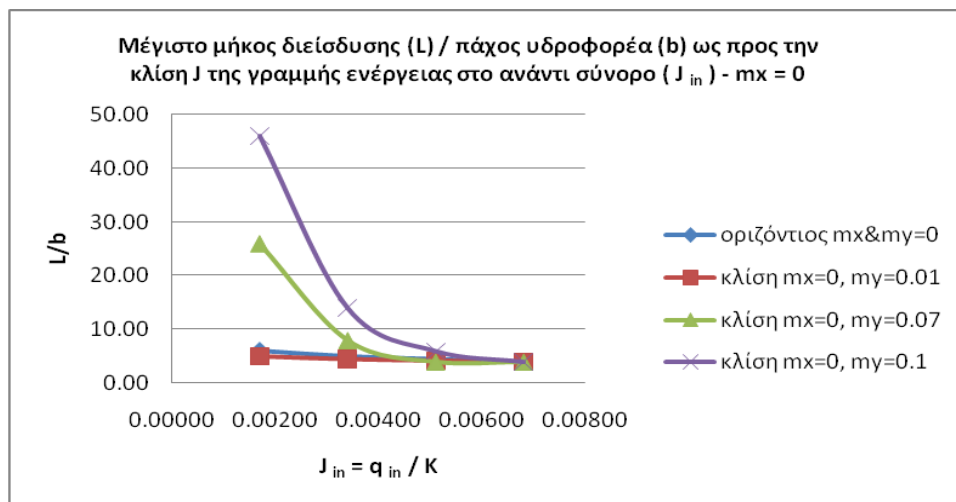
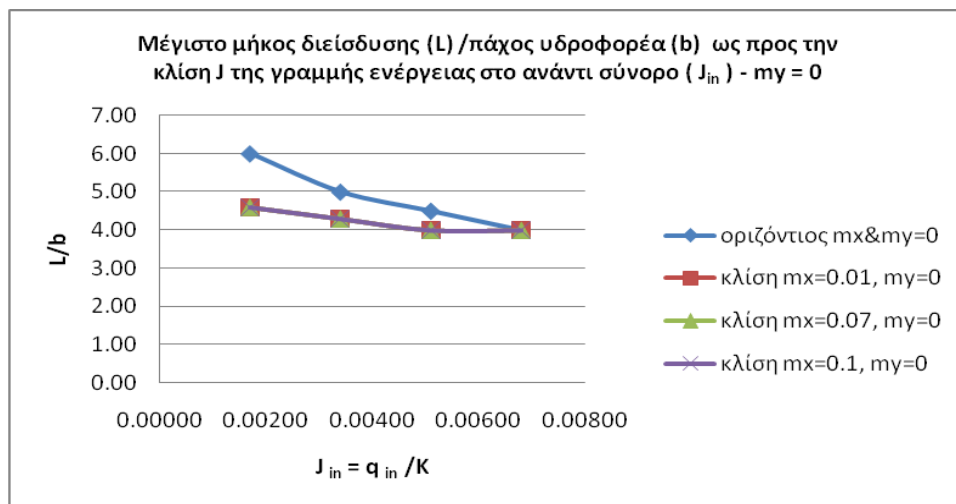
## 10.2. Συγκέντρωση άλατος - Μέγιστο μήκος διείσδυσης προς πάχος υδροφορέα στη θάλασσα ως προς την κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι σύνορο

Για τη σύγκριση επιλέγεται η ισογραμμή 100mg/lit (όριο πόσιμου νερού). Η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού L». Το μέγιστο μήκος διείσδυσης διαιρείται με την τιμή του πάχους του υδροφορέα στο σύνορο – θάλασσα. Στους υδροφορείς, όπου το πάχος μεταβάλλεται επί του συνόρου – θάλασσα, η διαίρεση πραγματοποιείται με τη μέση τιμή του. Στον άξονα των x τοποθετείται η κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι σύνορο που είναι ίση με τον λόγο της εισροής στον ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) διά την υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού υλικού (K).

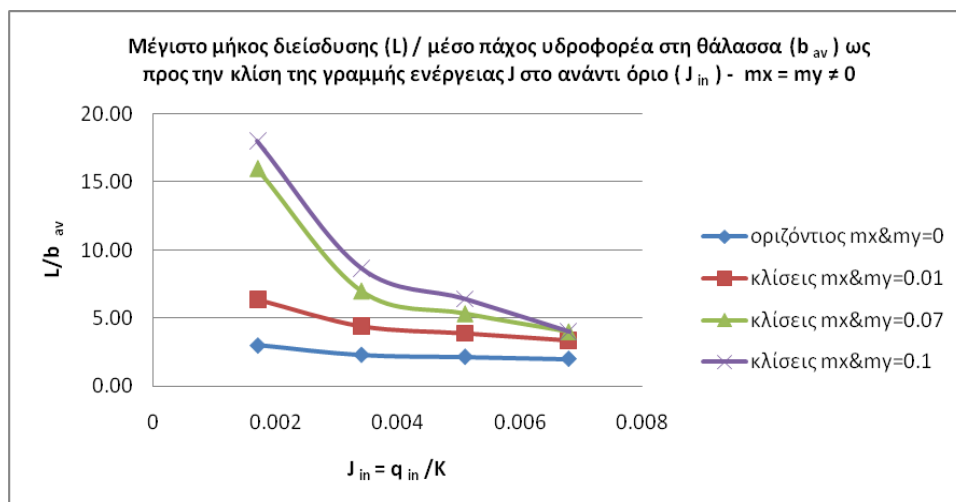
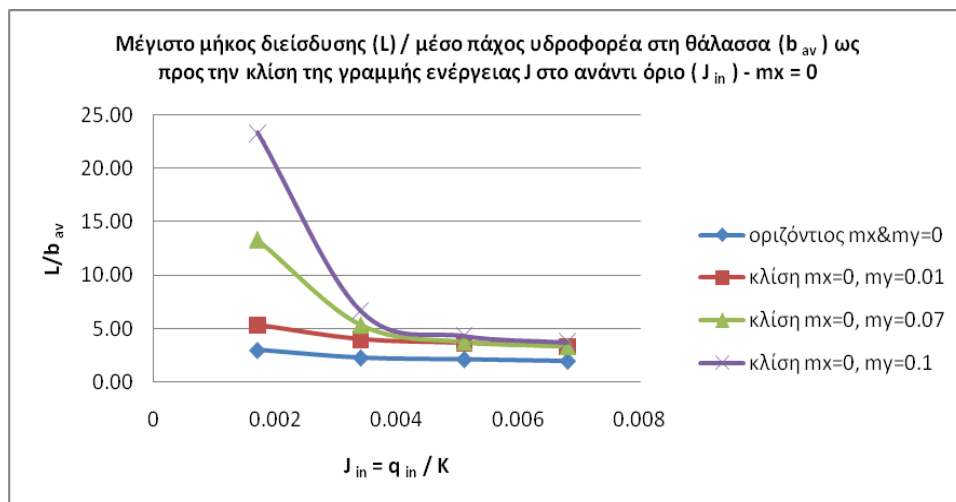
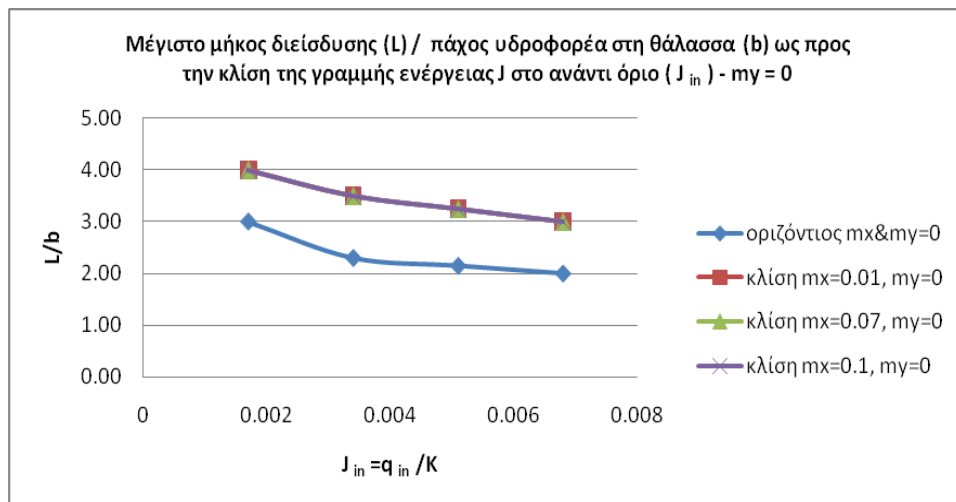
Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν σχετικά με τα παρακάτω γραφήματα μοιάζουν αρκετά με τις παρατηρήσεις που παρατίθενται στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, τα γραφήματα της ενότητας αυτής είναι πολύ πιο χρήσιμα, διότι συσχετίζουν δύο αδιάστατες ποσότητες, το μήκος διείσδυσης, όχι ως απόλυτη τιμή, αλλά ως πολλαπλάσιο του πάχους του υδροφορέα επί του συνόρου-θάλασσα και την κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι όριο. Παρ'όλα αυτά πρέπει να γίνει σαφές ότι δεν περιγράφουν τις περιπτώσεις εκείνες όπου η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο είναι πρώτου τύπου (προκαθορισμένη τιμή υδραυλικού φορτίου).



## 10.2.A. Υδροφορείς σταθερού πάχους



## 10.2.Β. Υδροφορείς μεταβαλλόμενου πάχους

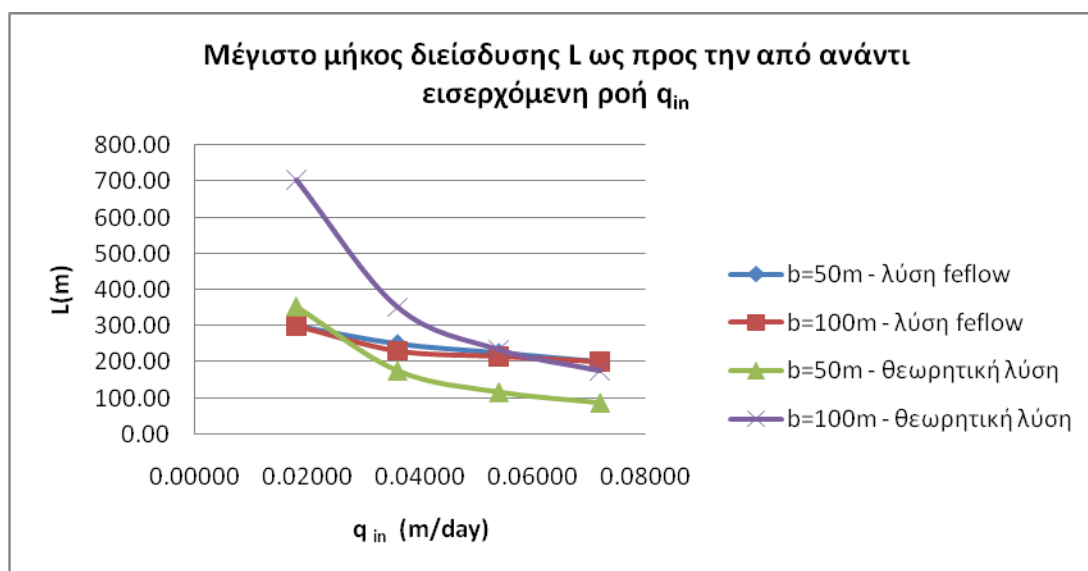


### 10.3. Συγκέντρωση άλατος - Σύγκριση θεωρητικής λύσης και λύσης με το λογισμικό FEFLOW για τον οριζόντιο υδροφορέα

Η λύση του λογισμικού feflow βασίζεται στη θεώρηση μεταβατικής ζώνης. Επιλέγεται η ισογραμμή 100mg/lit (όριο πόσιμου νερού), συγκεκριμένα η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα. Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού  $L$ ».

Η θεωρητική λύση βασίζεται στην θεώρηση απότομης διεπιφάνειας και την προσέγγιση Ghybben-Herzberg. Η μέγιστη απόσταση της διεπιφάνειας από το σύνορο-θάλασσα είναι επί του πυθμένα του υδροφορέα (Νάνου-Γιάνναρου, [4]).

Συγκρίνονται τα μέγιστα αυτά μήκη διείσδυσης του αλμυρού νερού για πάχος πενήντα και εκατό μέτρων.



**Γράφημα 10.3.1: Μέγιστα μήκη διείσδυσης στον οριζόντιο υδροφορέα για πάχος πενήντα και εκατό μέτρων**

Η αύξηση της τιμής της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) έχει, γενικά, ως αποτέλεσμα την μείωση του μέγιστου μήκους διείσδυσης ( $L$ ).

Η λύση με το λογισμικό feflow διαφέρει σημαντικά από τη θεωρητική λύση. Για μικρές τιμές ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο η θεωρητική λύση υπερτιμά το μήκος διείσδυσης σε σχέση με τη λύση του feflow ενώ για μεγαλύτερες τιμές το υποτιμά.

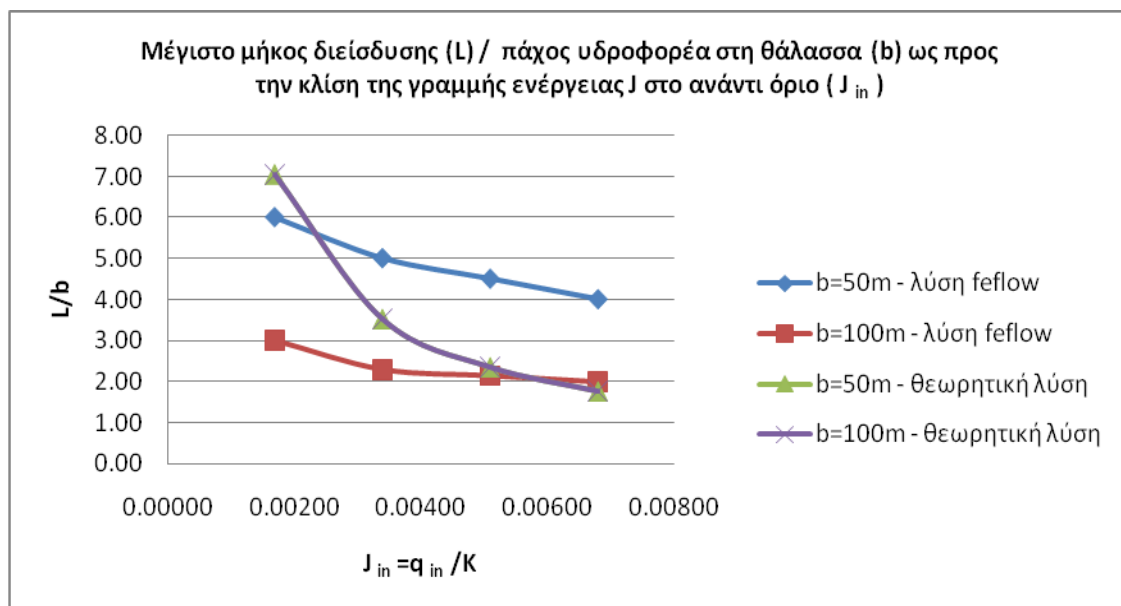
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα μήκη διείσδυσης που προκύπτουν από τη λύση με το λογισμικό feflow για πάχος πενήντα και εκατό μέτρων παρουσιάζουν αμελητέα διαφορά μεταξύ τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα σε αδιάστατη μορφή.

Η λύση του λογισμικού feflow βασίζεται στη θεώρηση μεταβατικής ζώνης. Επιλέγεται η ισογραμμή 100mg/lit (όριο πόσιμου νερού), συγκεκριμένα η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα επί του πυθμένα του υδροφορέα. Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού  $L$ ». Η απόσταση αυτή διαιρείται με το πλάτος του υδροφορέα στη θάλασσα και το πηλίκιο παρουσιάζεται στο γράφημα.

Η θεωρητική λύση βασίζεται στην θεώρηση απότομης διεπιφάνειας και την προσέγγιση Ghybben-Herzberg. Η μέγιστη απόσταση της διεπιφάνειας από το σύνορο-θάλασσα είναι επί του πυθμένα του υδροφορέα (Νάνου-Γιάνναρου, [4]). Η απόσταση αυτή διαιρείται με το πλάτος του υδροφορέα στη θάλασσα και το πηλίκιο παρουσιάζεται στο γράφημα.

Συγκρίνονται η τιμή των πηλίκων αυτών για πάχος πενήντα και εκατό μέτρων.



**Γράφημα 10.3.2: Μέγιστα μήκη διείσδυσης στον οριζόντιο υδροφορέα για πάχος πενήντα και εκατό μέτρων**

Η αύξηση της τιμής της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) έχει, γενικά, ως αποτέλεσμα την μείωση του πηλίκου  $L/b$ .

Η λύση με το λογισμικό feflow διαφέρει σημαντικά από τη θεωρητική λύση. Η θεωρητική λύση δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του πάχους. Στη λύση του λογισμικού feflow, η αύξηση του πάχους έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του  $L/b$ .

## 11. Συμπεράσματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

### 11.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε περιορισμένους υδροφορείς. Ένα εύρος τρισδιάστατων υδροφορέων με διαφορετική γεωμετρία προσομοιώθηκε με το λογισμικό FEFLOW ώστε να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση που έχει στα αποτελέσματα η μεταβολή της τιμής ορισμένων συνοριακών συνθηκών.

Η επίλυση του FEFLOW βασίζεται στη θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους ή ζώνης μετάβασης. Κυρίαρχο ρόλο στην προσέγγιση αυτή παίζει η υδροδυναμική διασπορά. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δύο συνιστώσες μιας φάσης) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς όπου η πυκνότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση.

Μελετήθηκαν περιορισμένοι υδροφορείς στους οποίους οι διαστάσεις της κάτοψης τους είναι πολύ μεγαλύτερες από την κατακόρυφη διάσταση (πάχος). Οι υδροφορείς χωρίστηκαν σε δύο ομάδες : α) υδροφορείς με σταθερό πάχος σε όλη τους την έκταση , β) υδροφορείς με μεταβαλλόμενο πάχος. Κάθε μια από τις ομάδες αυτές χωρίστηκε σε τέσσερις υποκατηγορίες :1) οριζόντιοι (horizontal) ,2) επικλινείς προς τη θάλασσα (seawards sloping) , 3) σχήματος V, που έχουν κλίση παράλληλη στην ακτογραμμή, (v-shaped) ,4) «στρεβλοί» , που έχουν κλίση και κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (warped) . Στους υδροφορείς αυτούς (εκτός από τον οριζόντιο) θα διερευνηθούν τα αποτελέσματα για διαφορετικές τιμές κλίσεων.

Οι υδροφορείς έχουν σε κάτοψη τέσσερα όρια . Το όριο «ενδοχώρα» -ανάντι όριο, το όριο θάλασσα ,που αντιστοιχεί στην ακτογραμμή , και τα δύο πλευρικά όρια που θεωρούνται αδιαπέρατα .Σε τομή έχουν το πάνω και το κάτω όριο που θεωρούνται αδιαπέρατα , εφόσον μελετάμε περιορισμένο υδροφορέα.

Οι συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν είναι :

Στο ανάντι όριο σταθερή εισερχόμενη ειδική παροχή γλυκού νερού (συγκέντρωση άλατος μηδέν , πυκνότητα ρευστού  $1\text{g/cm}^3$ )

Στο όριο-θάλασσα πίεση ίση με αυτή των υδροστατικών συνθηκών, συγκέντρωση άλατος ίση με τη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό ( $22000\text{mg/lit}$ ) και πυκνότητα ρευστού ίση με του θαλασσινού νερού ( $1.024\text{g/cm}^3$ ) , υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε εισροή από τη θάλασσα προς τον υδροφορέα.

Για την επιλογή των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων και του αριθμητικού σχήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στον οριζόντιο υδροφορέα. Οι διαστάσεις και το αριθμητικό σχήμα που επιλέγεται εφαρμόζεται και στις υπόλοιπες κατηγορίες υδροφορέων. Μετά την σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων και την οριστικοποίηση κάναβου, στρώσεων και αριθμητικού σχήματος, για κάθε μία από τις κατηγορίες υδροφορέων έχουν διαμορφωθεί τα «βασικά μοντέλα».

Τα αποτελέσματα για όλα τα βασικά μοντέλα παρουσιάζονται αναλυτικά. Σε κάτοψη και σε τομή παρουσιάζονται οι ισοδυναμικές και οι ισογραμμές της συγκέντρωσης. Επίσης, φαίνονται οι εισροές και οι εκροές νερού στο σύνορο-θάλασσα. Με απλή εποπτεία των αποτελεσμάτων γίνεται φανερό η σημαντική επίδραση της κλίσης του πυθμένα κάθετα προς την κατεύθυνση της εισερχόμενης ροής στο ανάντι σύνορο ( $my$ ).

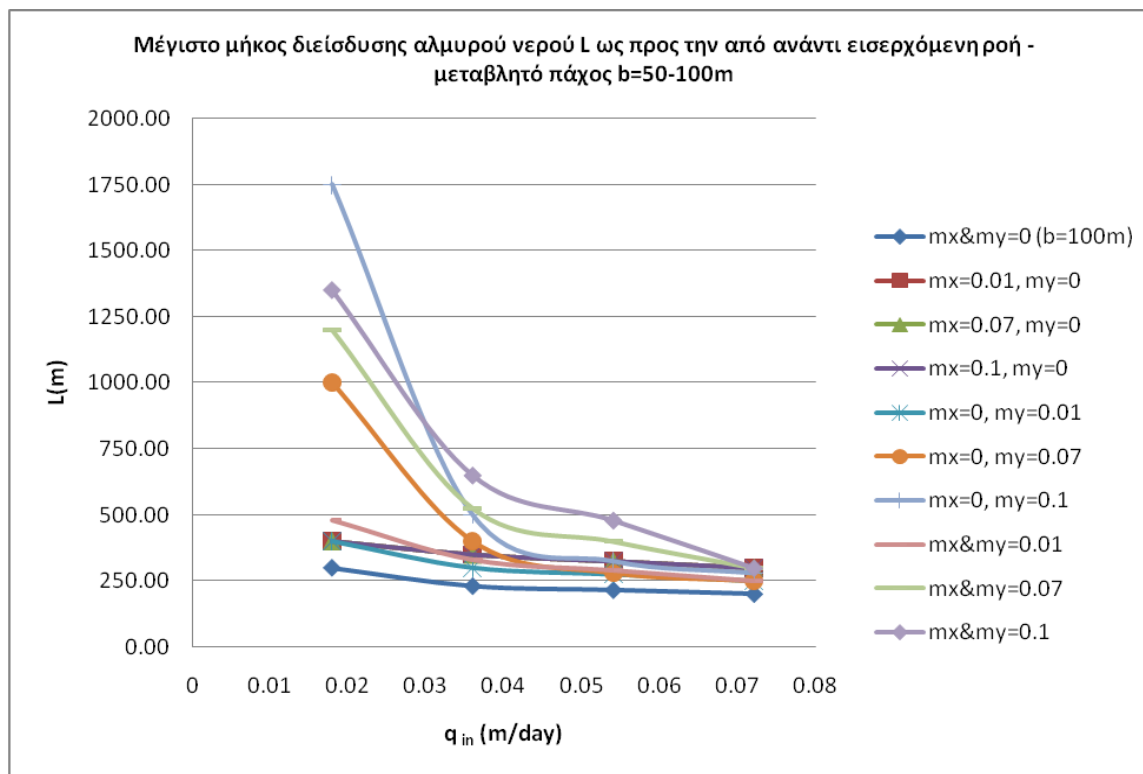
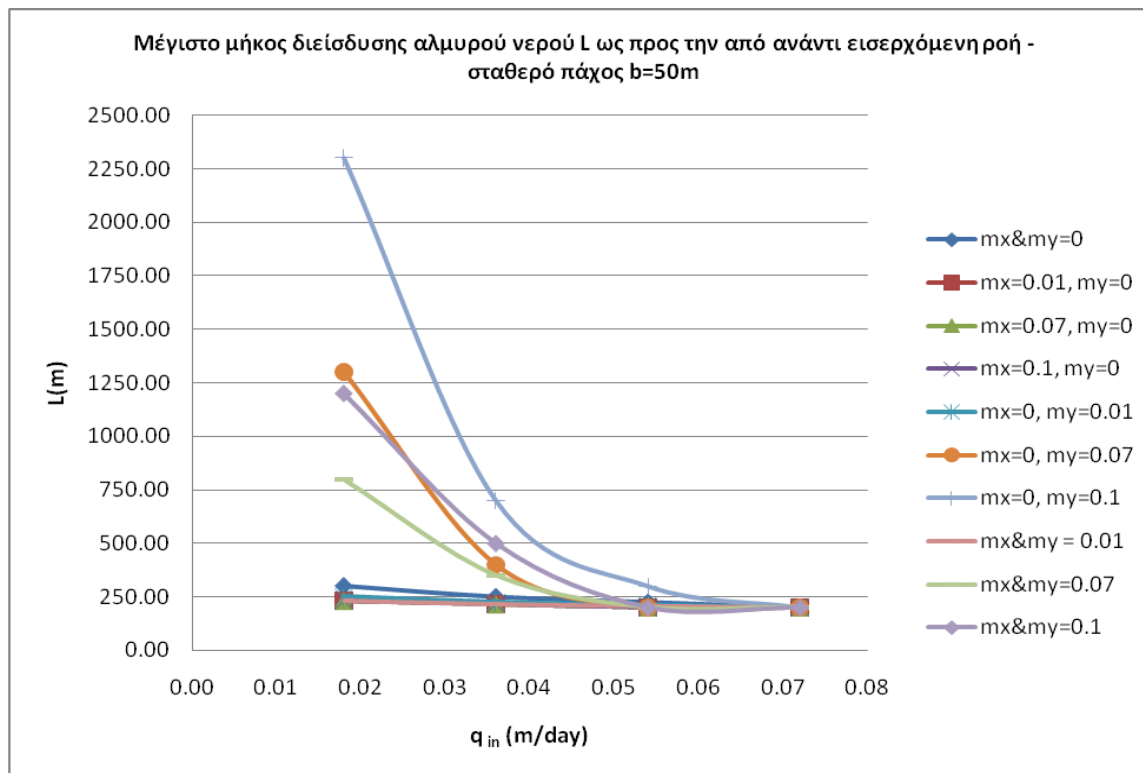
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα όπου φαίνεται η ποσότητα του εισερχόμενου και εξερχόμενου νερού και η ποσότητα της εισερχόμενης και εξερχόμενης διαλυμένης ουσίας (άλατος) κατά μήκος του συνόρου-θάλασσα για διαφορετικές γεωμετρίες υδροφορέων. Στα διάγραμματα αυτά παρατηρείται ότι όταν ο πυθμένας ή η οροφή του υδροφορέα έχει κλίση κάθετα προς την κατεύθυνση της εισερχόμενης ροής στο ανάντι σύνορο ( $my$ ), η παροχή νερού και άλατος μεταβάλλεται κατά μήκος του συνόρου-θάλασσα. Όταν η  $my$  είναι μηδενική, η παροχή νερού και άλατος είναι σταθερή. Είναι γεγονός ότι όταν η  $my$  είναι ίση με το μηδέν, η υφαλμύρωση μπορεί μελετηθεί και σε ένα επίπεδο διδιάστατο πρόβλημα στο κατακόρυφο επίπεδο. Όταν η  $my$  είναι διάφορη του μηδενός είναι έντονος ο τρισδιάστατος χαρακτήρας της ροής. Αυτό είναι το βασικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει και η δημοσιευμένη το 2007 εργασία «*Quasi-horizontal circulation cells on 3d seawater intrusion*» των Abarca, E., J.Carrera, X.Sanchez-Villa ([6]), η οποία αποτέλεσε αφορμή για την παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια τα βασικά μοντέλα τροποποιήθηκαν ως προς την τιμή της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ). Δημιουργήθηκαν και εκτελέστηκαν αρχεία μεγαλύτερες τιμές  $q_{in}$ . Τα αποτελέσματα των αρχείων αυτών δεν παρουσιάστηκαν αναλυτικά. Παρουσιάστηκαν οι τιμές ορισμένων μόνο μεγεθών και η διακύμανση τους σε σχέση με την τιμή της εισροής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ).

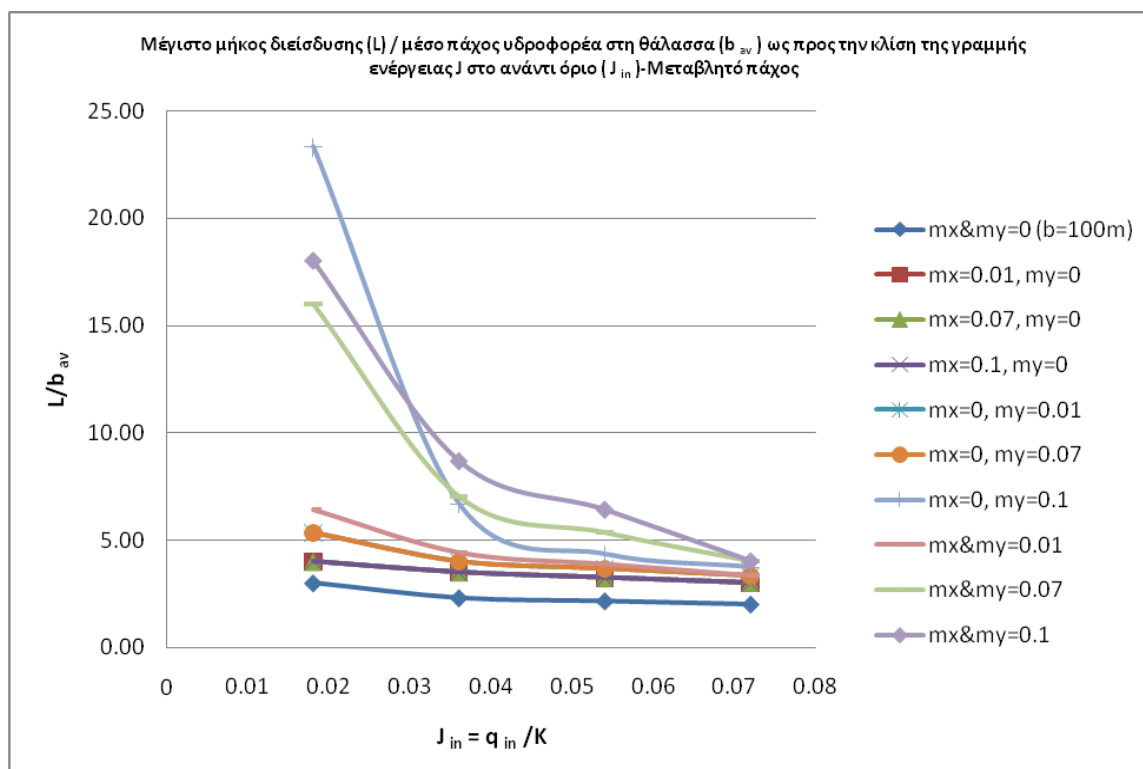
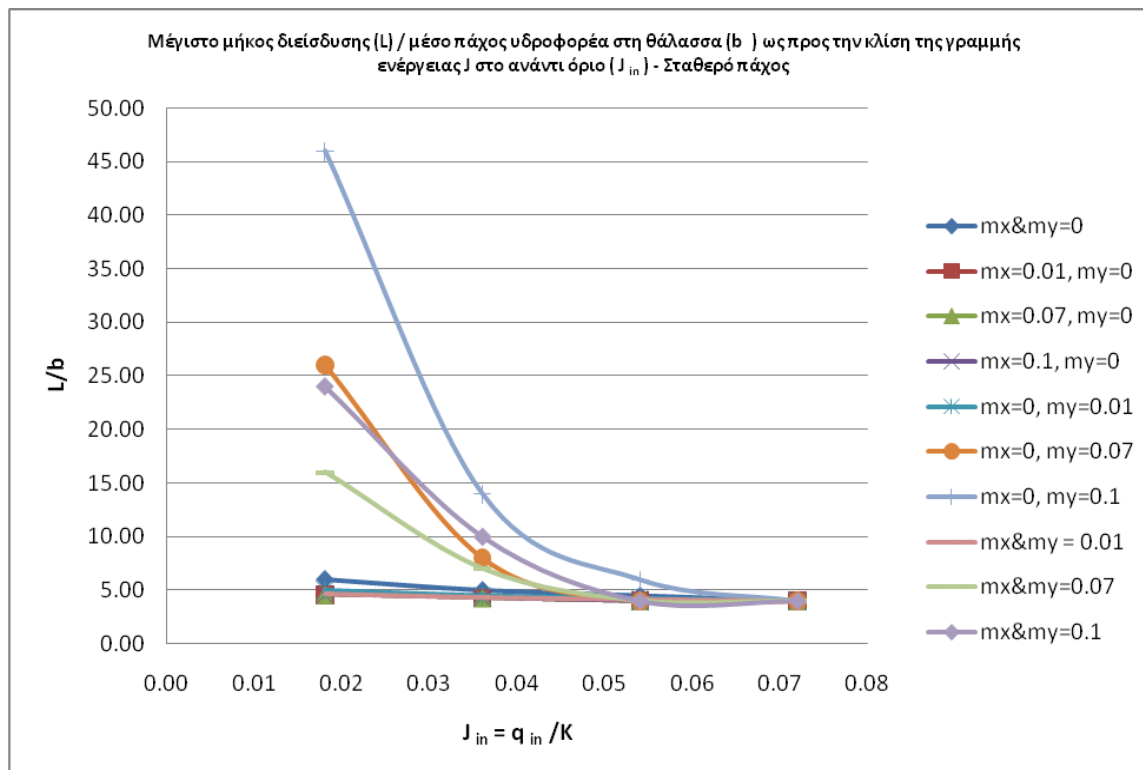
Συγκεκριμένα, για να μελετηθεί πιο αναλυτικά η επίδραση της κλίσης πυθμένα και οροφής στα αποτελέσματα επιλέχθηκε η ισογραμμή της συγκέντρωσης των 100mg/lit (όριο πόσιμου νερού) και συγκεκριμένα η μέγιστη απόσταση της ισογραμμής από το σύνορο-θάλασσα, επί του πυθμένα του υδροφορέα. Η απόσταση αυτή μπορεί, καταχρηστικά, να ονομαστεί «μέγιστο μήκος διείσδυσης του αλμυρού νερού  $L$ ».

Ακολουθούν δύο γραφήματα που συνοψίζουν την μεταβολή του μήκους διείσδυσης για διαφορετικές γεωμετρίες υδροφορέων και τιμές εισροής στο ανάντι σύνορο. Τα επόμενα δύο γραφήματα συσχετίζουν αδιάστατες ποσότητες. Το μήκος διείσδυσης διαιρεμένο με το μέσο πάχος του υδροφορέα στο σύνορο-θάλασσα και την κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι σύνορο (ειδική παροχή διά την υδραυλική αγωγιμότητα).

Γραφήματα 11.1.1/2 : Μέγιστο μήκος διείσδυσης αλμυρού νερού



**Γραφήματα 11.1.3/4: Μέγιστο μήκος διείσδυσης αλμυρού νερού προς πάχος υδροφορέα στη θάλασσα προς κλίση της γραμμής ενέργειας στο ανάντι σύνορο**





Η αύξηση της τιμής της εισερχόμενης ειδικής παροχής στο ανάντι σύνορο ( $q_{in}$ ) έχει, γενικά, ως αποτέλεσμα την μείωση του μέγιστου μήκους διείσδυσης ( $L$ ).

Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των κλίσεων του πυθμένα και της οροφής, τόσο πιο ευαίσθητα είναι τα αποτελέσματα στις μεταβολές της  $q_{in}$ . Σε ορισμένες από τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν το γράφημα παρουσιάζει τάση σταθεροποίησης στις μεγαλύτερες τιμές  $q_{in}$ , ενώ στις υπόλοιπες εξακολουθεί να έχει κλίση προς τα κάτω. Σε κάθε περίπτωση, το μήκος διείσδυσης πέφτει κάτω από τα τριακόσια μέτρα και ο λόγος  $L/b$  κάτω από πέντε.

Οι υδροφορείς με κλίση  $m_y$  διάφορη του μηδενός παρουσιάζουν, γενικά, σημαντικά μεγαλύτερα μήκη διείσδυσης από τους υδροφορείς με κλίση  $m_y$  ίση με το μηδέν.

Οι υδροφορείς με διπλή κλίση  $m_x$  &  $m_y$ , διάφορη του μηδενός, παρουσιάζουν μικρότερα μήκη διείσδυσης από τους αντίστοιχους υδροφορείς με κλίση  $m_y$  διάφορη του μηδενός και κλίση  $m_x$  ίση με το μηδέν, διότι στην πρώτη περίπτωση η κλίση  $m_x$  εξασφαλίζει περισσότερη «όρμη» στο από ανάντι ερχόμενο γλυκό νερό.

## 11.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Θέματα τα οποία έχει ενδιαφέρον να διερευνηθούν στη συνέχεια είναι τα εξής:

- i) Προσομοίωση υδροφορέων με διαφορετικές διαστάσεις σε κάτοψη, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα δημιουργίας αδιάστατων γραφημάτων επί της κάτοψης του υδροφορέα.
- ii) Η συνοριακή συνθήκη στο ανάντι όριο να είναι προκαθορισμένο υδραυλικό φορτίο, αντί για ειδική παροχή, που θα μπορούσε να προσομοιώνει π.χ. μία λίμνη. Στο FEFLOW δίνεται η δυνατότητα για συνοριακή συνθήκη τρίτου τύπου, στην οποία προκαθορίζεται το υδραυλικό φορτίο αλλά η παροχή νερού προς τον υδροφορέα καθορίζεται από ένα ενδιάμεσο στρώμα αρκετά μικρότερης υδραυλικής αγωγιμότητας.
- iii) Τοποθέτηση σημείων άντλησης νερού, πηγαδιών, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της άντλησης στην υφαλμύρωση και ακόμη να ευρεθούν οι βέλτιστες θέσεις ενός συγκεκριμένου αριθμού πηγαδιών με στόχο την ελαχιστοποίηση της επέκτασης της υφαλμύρωσης προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- iv) Επιλογή «divergent form of transport» στο μενού «Options» του λογισμικού FEFLOW, τροποποίηση του ορισμού των συνοριακών συνθηκών, χωρίς να διαφοροποιείται η φυσική σημασία τους, και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν με την επιλογή «convective form of transport», που αποτέλεσε και την επιλογή της παρούσας εργασίας.
- v) Διερεύνηση για την επίδραση που έχει στα αποτελέσματα το αριθμητικό σχήμα (no upwinding, streamline upwinding, full upwinding) και η επαναληπτική μέθοδος επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που προκύπτει.
- vi) Διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του πυθμένα στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε φρεάτιους υδροφορείς.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

- 1.Αγιουτάντης , Ζ.Γ. & Σ.Π. Μέρτικας (2003). *Ένας πρακτικός οδηγός για τη συγγραφή τεχνικών κειμένων* ,Εκδόσεις Ίων , Αθήνα
- 2.Κοψιαύτης Γιώργος (2005). *Προσομοίωση παράκτιων υδροφορέων με τρισδιάστατα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας - Εφαρμογή σε υδροφορέα της νήσου Θήρας* ,Μεταπτυχιακή εργασία , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ,Επιβλέπων : Α. Μαντόγλου
- 3.Μπακόπουλος, Α. & Ι.Χρυσοβέργης (2003). *Αριθμητικές μέθοδοι μερικών διαφορικών εξισώσεων* ,Εκδόσεις Συμείων , Αθήνα
- 4.Νάνου -Γιανναρού , Α. (2006). *Εισαγωγή στα υπόγεια νερά* ,Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα
- 5.Νικηφοράκης Ιωάννης (2008). *Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα βόρειας παραλιακής και ημιλοφώδους ζώνης Νομού Κορινθίας* ,Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ,Επιβλέπουσα : Α.Νάνου -Γιανναρού

### Αγγλική

- 6.Abarca , E. , J.Carrera , X.Sanchez-Villa , C.I.Voss (2007). *Quasi-horizontal circulation cells on 3d seawater intrusion* ,Journal of hydrology, Vol 339 , pp.118-129, last reviewed : March 1,2010 ,<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00221694>
- 7.Anderson , M.P. & W.W. Woessner (1992). *Applied groundwater modelling : Simulation of flow and advective transport* , Academic Press , USA
- 8.Bear , J. (1979). *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill , New York
9. Bear, J., A.H.-D. Cheng , S. Sorek , D.Ouazar & I.Herrera (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers - concepts , methods and practices* ,Kluwer Academic Publishers ,The Netherlands
- 10.Bolster, D.T. , D.M. Tartakovsky , M.Dentz (2007). *Analytical models of contaminant transport in coastal aquifers* ,Advances in Water Resources Vol 30 , pp.1962-1972
- 11.Diersch H.-J.G. (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , Reference Manual* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 12.Diersch H.-J.G. , P.Schatzl , R. Grundler & V. Clausnitzer (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , User's Manual* ,DHI-WASY GmbH , Germany

- 13.Diersch H.-J.G. et al (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , White Papers Vol. I* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 14.Diersch H.-J.G. et al (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , White Papers Vol. II* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 15.Diersch H.-J.G. et al (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , White Papers Vol.III* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 16.Diersch H.-J.G. et al (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , White Papers Vol. IV* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 17.Diersch H.-J.G. et al (2009). *DHI-WASY Software FEFLOW : Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System , White Papers Vol. V* ,DHI-WASY GmbH , Germany
- 18.Huyakorn , P.S. & G.F. Pinder (1983). *Computational methods in subsurface flow* , Academic Press , USA
- 19.Kolditz , O. (2002). *Computational methods in Environmental Fluid Mechanics* , Springer, Germany
- 20.Kolditz , O. , R.Ratke , H-J G. Diersch , W. Zielke (1998) . *Coupled groundwater flow and transport:1.Verification of variable density flow and transport models* ,Advances in Water Resources Vol 21 , pp.27-46
- 21.Lapidus L. & G.F. Pinder (1999). *Numerical solution of partial differential equations in science and engineering* ,John Wiley & Sons , New York
- 22.Rushton ,K.R. (2003). *Groundwater Hydrology - Conceptual and computational models* ,John Wiley & Sons , England
- 23.Todd , D.K. & L.W. Mays (2005). *Groundwater hydrology* ,John Wiley & Sons , New York
- 24.Wang , H.F. & M.P. Anderson (1982). *Introduction to groundwater modelling - finite difference and finite element methods* , Academic Press , USA
- 25.Zienkiewicz , O.C. & R.L. Taylor (1991). *The finite element method,Volume1 : solid and fluid mechanics,dynamics and non-linearity* ,McGraw-Hill , United Kingdom
- 26.Zienkiewicz , O.C. & R.L. Taylor (1991). *The finite element method,Volume2 : solid and fluid mechanics,dynamics and non-linearity* ,McGraw-Hill , United Kingdom

## **Ιστοτόποι**

27. <http://www.feflow.info/documentation.html>
28. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00221694>
29. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03091708>
30. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/>